

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

BIBLIOTECA
INGENIERIA
MARITIMA

**"ENSAYOS PRIMARIOS DE
MATERIALES COMPUESTOS
EMPLEANDO FIBRAS NATURALES
NACIONALES"**

TOPICO DE GRADUACION

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

Alejandro Chanabá Ruiz

Guissepp Ospino Isaza

Gonzalo Ruperti Sánchez

**Guayaquil - Ecuador
1998**

DEDICATORIA



BIBLIOTECA
FAC. CIEN.
MEXICO

Aquel que en todo momento está con nosotros:

Dios.

A esa persona sin la cual ninguna meta se hubiera podido alcanzar, su apoyo ha sido invaluable, para ellas nuestra gratitud será eterna:

Nuestras Madres.

AGRADECIMIENTO



BIBLIOTECA
NACIONAL
MEXICANA

Al Dr. José Marín López., por su valiosa
colaboración.

A la Escuela Superior Politécnica por la
invalorable ayuda brindada.

A todas aquellas personas que nos
brindaron su apoyo, paciencia y amistad,
durante la elaboración del presente trabajo.



RESUMEN

BIBLIOTECA
FAC. CIEN.
MARITIMA

Se desarrollaron pruebas para determinar las propiedades mecánicas básicas de las siguientes fibras naturales ecuatorianas: cabuya, yute y caña guadua. Luego, se determinaron experimentalmente las propiedades mecánicas de compuestos (resina epóxica+fibra natural) que sirvieron para comprobar ciertas relaciones analíticas Micromecánicas y Macromecánicas, y de Resistencia, siguiendo el modelo de material ortotrópico.

Los primeros ensayos permitieron determinar las propiedades mecánicas básicas, Módulo de Young, y, Esfuerzo y Deformación Unitaria en la rotura, de las fibras naturales mencionadas. La más rígida es la cabuya, con módulo de Young, aproximadamente cinco veces menor que los correspondientes a fibras sintéticas tipo S-G, como se resume en la tabla 14.

Se desarrollaron luego ensayos de flexión y corte, con probetas de materiales compuestos, para determinar las propiedades mecánicas, en función de la dirección de la aplicación de la carga. Se pretendía comprobar tanto las relaciones Micromecánicas (propiedades del compuesto en función de las propiedades de los componentes individuales), como las Macromecánicas

(dependencia de las propiedades mecánicas en términos de la dirección de aplicación de las cargas). En general el módulo de Young en función de la dirección se predice adecuadamente con la ecuación (1.11), mientras que el módulo de Corte y la razón de Poisson, presentan la tendencia adecuada, pero se diferencian un poco en valor estimado.

Las pruebas de tensión permitieron comprobar un modelo sencillo de resistencia de los materiales compuestos. Se presentan dos puntos ó esfuerzos de "falla": el primero al alcanzarse el esfuerzo de rotura de la matriz (resina), y el segundo, cuando se rompe finalmente la fibra.



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MATERIA

INDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|-------------|
| RESUMEN | VI |
| ÍNDICE GENERAL..... | VIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | X |
| ÍNDICE DE FOTOS..... | XII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XIII |
| INTRODUCCIÓN..... | XV |
| 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS | 17 |
| 1.1 Introducción..... | 17 |
| 1.2 Relaciones Esfuerzo - Deformación en 2 Dimensiones..... | 18 |
| 1.3 Predicción de las Constantes de Ingeniería empleando Análisis Micromecánico..... | 23 |
| 1.4 Dependencia de las Propiedades Mecánicas respecto de la orientación de los ejes principales..... | 28 |
| 1.5 Análisis de Resistencia de la Lámina..... | 31 |
| 1.6 Resumen de las fórmulas a comprobarse..... | 35 |
| 2. TRABAJO EXPERIMENTAL..... | 37 |
| 2.1 Descripción de Ensayos..... | 39 |
| 2.2 Preparación de Probetas..... | 41 |
| 2.3 Determinación del Porcentaje Volumétrico..... | 55 |

| | |
|---|-----|
| 2.4 Prueba de las Fibras..... | 60 |
| 2.5 Prueba de Tensión..... | 64 |
| 2.6 Prueba de Corte..... | 70 |
| 2.7 Prueba de Flexión..... | 78 |
| 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 84 |
| 3.1 Introducción..... | 84 |
| 3.2 Propiedades de los Componentes (Fibra y Matriz)..... | 87 |
| 3.3 Propiedades mecánicas del material compuesto..... | 91 |
| 3.4 Módulo de Corte..... | 109 |
| 3.5 Análisis de Resistencia | 115 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 119 |
| APÉNDICES | |
| I. Deducción de las Propiedades Mecánicas..... | 123 |
| II. Deducción de fórmulas utilizadas en las Pruebas de Flexión..... | 134 |
| III. Resultados de las Pruebas..... | 142 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 184 |



BIBLIOTECA
FAC. IING
MATEMÁTICA

INDICE DE FIGURAS

| Nº | | Pág. |
|----|---|------|
| 1 | Estados de esfuerzos en dos dimensiones para la lámina ortotrópica.. | 19 |
| 2 | Estados de esfuerzos simples de la lámina..... | 22 |
| 3 | Lámina ortotrópica con un sistema de coordenadas principales..... | 27 |
| 4 | Curva esfuerzo - deformación para la fibra, matriz, y, compuesto..... | 34 |
| 5 | Secuencia seguida en el desarrollo del procedimiento experimental... | 38 |
| 6 | Plano de las probetas para prueba de corte..... | 50 |
| 7 | Plano de las probetas para prueba de tensión | 51 |
| 8 | Esquema del equipo utilizado para medir la deformación en la fibra. | 61 |
| 9 | Probeta Típica para prueba de tensión de una fibra..... | 62 |
| 10 | Curva Esfuerzo vs Def. Unitaria fibra de yute probeta 1..... | 63 |
| 11 | Probeta típica para ensayo de Tensión..... | 64 |
| 12 | Curva carga - extensión para el compuesto resina - cabuya..... | 68 |
| 13 | Dimensiones principales de la probeta típica para prueba de corte..... | 70 |
| 14 | Plano del "Dispositivo para prueba de Corte"..... | 72 |
| 15 | Curva Carga - Extensión compuesto resina - yute..... | 74 |
| 16 | Dispositivo para prueba de flexión..... | 79 |
| 17 | Correlación Teoría - Experimento..... | 86 |
| 18 | Curva Esfuerzo - Deformación Unitaria (Fibra de Yute, Probeta No1) | 89 |
| 19 | Módulo de Elasticidad Resina + Cabuya. Probeta No 1 $\theta=90^\circ$ | 95 |
| 20 | Comparación del Módulo de Young para Resina - Cabuya..... | 98 |
| 21 | Comparación del Módulo de Young para Resina - Yute..... | 99 |
| 22 | Comparación del Módulo de Young para al Resina - Caña..... | 100 |

| | | |
|----|---|-----|
| 23 | Comparación Teórica - Experimental de la Razón de Poisson para Resina - Cabuya..... | 105 |
| 24 | Comparación Teórica - Experimental de la Razón de Poisson para Resina - Yute..... | 106 |
| 25 | Comparación Teórica - Experimental de la Razón de Poisson para Resina - Caña..... | 107 |
| 26 | Comparación Teórica - Experimental del Modulo de Corte para Resina - Cabuya..... | 112 |
| 27 | Comparación Teórica - Experimental del Modulo de Corte para Resina - Yute..... | 113 |
| 28 | Curva Esfuerzo - Deformación para la fibra de cabuya..... | 117 |
| 29 | Curva Esfuerzo - Deformación para la fibra de yute..... | 118 |
| 30 | Representación de los esfuerzos que actúan en un elemento..... | 125 |
| 31 | Dispositivo para la prueba de flexión..... | 134 |
| 32 | Diagrama de cuerpo libre..... | 136 |
| 33 | Corte transversal de la viga de material sanduche..... | 138 |
| 34 | Distribución de momento flector..... | 140 |

INDICE DE FOTOS



| Nº | | Pág. |
|----|---|------|
| 1 | Limpieza y delimitación de la superficie de la plancha..... | 42 |
| 2 | El desmoldante es aplicado sobre la superficie delimitada..... | 42 |
| 3 | La resina se vierte en un recipiente limpio y seco | 43 |
| 4 | Se agrega estireno a la resina para diluirla..... | 44 |
| 5 | Se esparce uniformemente la resina sobre la superficie | 45 |
| 6 | La tela de Yute es colocada sobre la resina..... | 46 |
| 7 | Aplicando una segunda mano de resina cubrir imperfecciones..... | 46 |
| 8 | Se cubre la plancha con el maylo y se eliminan los excesos..... | 47 |
| 9 | Plancha de material compuesto Cabuya - resina..... | 48 |
| 10 | Elaboración del material sanduche..... | 49 |
| 11 | Material sanduche Resina + Cabuya + Balsa..... | 49 |
| 12 | Corte del material tipo sanduche..... | 52 |
| 13 | Toma de dimensiones | 53 |
| 14 | Balanza analítica utilizada para registrar el peso..... | 53 |
| 15 | Pesaje de un espécimen de Cabuya de 10 x 10 cm de longitud..... | 56 |
| 16 | Probetas de caña guadua para prueba de tensión de las fibras..... | 61 |
| 17 | Máquina de ensayo universal utilizada en los ensayos..... | 66 |
| 18 | Mordazas sujetando la probeta de cabuya..... | 67 |
| 19 | Dispositivo para prueba de Corte..... | 73 |
| 20 | Máquina de ensayo universal con el dispositivo prueba de corte..... | 74 |
| 21 | Probeta de Yute utilizada para ensayo de corte..... | 77 |
| 22 | Probeta y equipo utilizado para prueba de flexión..... | 78 |
| 23 | Instalación de extenómetro..... | 81 |

INDICE DE TABLAS

| N° | | Pág. |
|----|--|------|
| 1 | Dependencia Propiedades Mecánicas con respecto de la orientación.. | 31 |
| 2 | Fórmulas teóricas para determinar las propiedades del compuesto..... | 36 |
| 3 | Ensayos desarrollados y propiedad encontrada | 39 |
| 4 | Promedio para una probeta para ensayo de tensión a 0 grados..... | 54 |
| 5 | Valores obtenidos para el cálculo de densidad de la fibra de yute..... | 57 |
| 6 | Valores obtenidos para el cálculo de densidad de las fibras de Cabuya y Caña Guadua..... | 58 |
| 7 | Valores registrados para la fibra de yute probeta 1..... | 63 |
| 8 | Carga de ruptura de la fibra y matriz registrados para el hilo de yute | 69 |
| 9 | Carga de ruptura de la fibra y matriz para el hilo de cabuya..... | 69 |
| 10 | Módulo de corte obtenido para el compuesto resina - cabuya..... | 76 |
| 11 | Módulo de corte experimental para el compuesto resina - yute..... | 76 |
| 12 | Valores registrados para una probeta de Yute sometida flexión..... | 82 |
| 13 | Transformación de valores Carga - Despl. a Esfuerzo - Deformación (Fibra de Yute, Probeta No 1)..... | 88 |
| 14 | Propiedades de Fibras Naturales..... | 89 |
| 15 | Fracciones Volumétricas de los Componentes..... | 91 |
| 16 | Datos Carga - Deflexión y Carga - Deformación (Probeta No 1, Resina+Cabuya)..... | 94 |
| 17 | Módulo de Elasticidad Resina + Cabuya. Probeta No 1 $\theta = 90^\circ$ | 96 |
| 18 | Módulo de Elasticidad Teórico y Experimental para Materiales Compuestos empleando fibras naturales como refuerzo..... | 97 |
| 19 | Carga - Relación de Poisson (Material Sanduche Cabuya)..... | 103 |

| | | |
|----|---|-----|
| 20 | Comparación de Razón de Poisson experimental y Teórica para Materiales Compuestos..... | 104 |
| 21 | Valores experimentales y teóricos de Módulo de Corte para Materiales Compuestos..... | 111 |
| 22 | Deformación Unitaria y Esfuerzos de Rotura de la fibra de Cabuya.. | 116 |
| 23 | Deformación Unitaria y Esfuerzos de Rotura de la fibra de Yute..... | 116 |



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MAR 1984

INTRODUCCION

Materiales compuestos, formados por resinas plásticas y reforzadas con fibras de diferente tipo, están alcanzando gran éxito como material estructural. La razón peso a resistencia, los presentan con gran ventaja sobre otras opciones posibles. En nuestro medio, entre otros, han encontrado gran uso en la construcción de embarcaciones pesqueras artesanales, mejor conocidas como "fibras".

Existen en el medio fibras naturales que podrían reemplazar a las plásticas en la preparación de materiales compuestos. Estas fibras con un adecuado tratamiento para resistir el deterioro, sobre todo en ambientes húmedos, podrían proveer la necesaria rigidez en miembros estructurales. Este reemplazo podría significar ahorro en el costo del producto final, y también en un ahorro de divisas al evitar la importación de las fibras sintéticas. De manera que la investigación de la potencialidad de fibras naturales ecuatorianas para formar materiales compuestos, es altamente recomendable.

En el presente trabajo, se pretende determinar primero la potencialidad de ciertas fibras naturales ecuatorianas como refuerzo de materiales compuestos.

Entonces, primero ciertas propiedades elásticas como el módulo de Young y el esfuerzo de rotura de la cabuya, el yute, y la caña guadua deben ser determinados. Luego, se prepararán ensayos para determinar las propiedades elásticas de compuestos en tensión, flexión y corte, variando la dirección de aplicación de la carga. Estas propiedades son indispensables para el diseño de estructuras con materiales compuestos, y contándose con poca experiencia en el medio al respecto, su determinación y comparación con relaciones analíticas, será de mucha utilidad.



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

CAPITULO 1

PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Un material es llamado compuesto "si está constituido por dos o más componentes en una estructura macroscópica, con el fin de aprovechar ciertas propiedades mecánicas de cada componente", [5]. En el caso del plástico reforzado con fibras naturales se tienen dos componentes: la fibra natural, y, una resina epóxica. La fibra natural sirve de refuerzo y es la que aporta principalmente a la resistencia del compuesto; tiene elevada rigidez, pero, baja dureza. En cambio, la resina epóxica que sirve de matriz, contribuye a la dureza y ductilidad del compuesto, previene la degradación de la fibra y de daños externos, y, transfiere y distribuye las cargas a las fibras.

Los materiales compuestos poseen propiedades mecánicas diferentes en distintas direcciones. Se dice que tales materiales son *anisotrópicos* ([4] y [6]).

Para desarrollar las ecuaciones que permitan analizar los materiales compuestos, se emplea como primer modelo la lámina reforzada unidireccional, que tiene un arreglo paralelo de fibras continuas. La lámina,

como se mostrará posteriormente, tiene 3 planos mutuamente ortogonales, con propiedades diferentes y simétricas en las tres direcciones, [4], por eso, es llamado un material *ortotrópico*, o sea, anisotrópico simplificado.

La relación esfuerzo (σ)-deformación (ε) para la lámina ortotrópica es la base del análisis de plástico reforzado con fibras. A partir de las relaciones micromecánicas, llamadas Reglas de las Mezclas, e, Inverso de las Mezclas, se obtendrán las constantes principales de ingeniería (E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12}) en función de las constantes elásticas de las componentes: fibra y matriz (E_{f1} , E_{f2} , E_m , G_{f12} , G_m , ν_{f12} y ν_m). Además partiendo de las relaciones macromecánicas esfuerzo-deformación, llamada Ley de Hooke, se obtendrán las propiedades mecánicas del compuesto (E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy}) en función de las constantes de ingeniería (E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12}) y de la dirección de aplicación de los reforzamientos.

1.2. RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN 2-DIMENSIONES

En este caso, la lámina ortotrópica se la considera como en un estado de esfuerzos bidimensional (sistema de coordenadas 12), y es descrito por tres componentes de esfuerzos, σ_1 , σ_2 , y, τ_{12} , es decir, σ_3 , τ_{13} y τ_{23} se consideran nulos, como se muestra en la figura 1.

Acorde a la notación convencional, σ_1 y σ_2 son *esfuerzos normales* (resultan de la acción de componentes de fuerzas perpendiculares al plano de la sección transversal), y τ_{12} es un *esfuerzo cortante* (proviene de componentes paralelas al plano de la sección). Cada componente de esfuerzo tiene su correspondiente componente de deformación unitaria: ϵ_1 y ϵ_2 son *deformaciones normales* (describe el alargamiento o contracción por unidad de longitud), y γ_{12} es la *deformación angular ó por corte* (es la deformación distorsional asociada con líneas paralelas a los ejes 1 y 2).

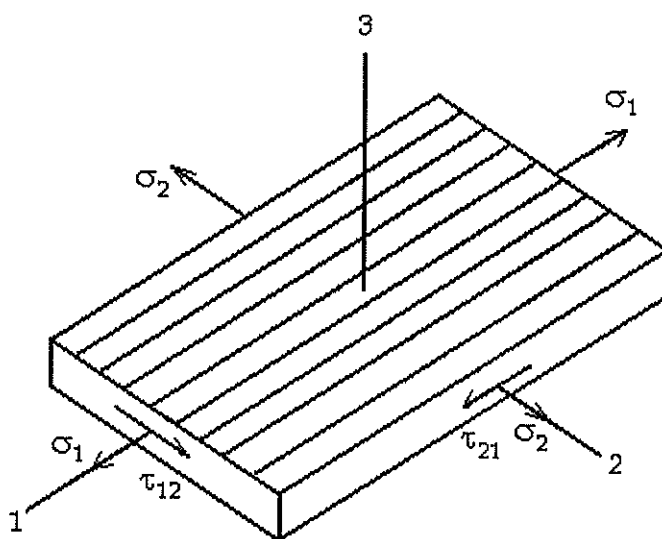


Figura 1

Estado de esfuerzos en dos dimensiones para la lámina unidireccional ortotrópica

La Ley de Hooke para un material anisotrópico linealmente elástico, que relaciona esfuerzo con deformación está dada por la siguiente ecuación, escrita en forma de matriz:



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MANIZALES

$$\{ \sigma \} = [C] \{ \varepsilon \}, \quad (1.1)$$

donde: $\{ \sigma \} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \tau_{12}]^T$, es el vector columna esfuerzo, $\{ \varepsilon \} = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \gamma_{12}]^T$, es el vector columna deformación unitaria, y, $[C]$, es la matriz rigidez ("stiffness") de 3x3 con 9 constantes. Alternativamente, la Ley de Hooke anisotrópica, ecuación (1.1), puede ser escrita como:

$$\{ \varepsilon \} = [S] \{ \sigma \}, \quad (1.2)$$

donde $[S]$ es la matriz flexibilidad ("compliance") de 3x3, que es la inversa de la matriz rigidez: $[S] = [C]^{-1}$.

La Ley de Hooke anisotrópica puede ser simplificada debido a la simetría del compuesto, entonces como resultado de la energía de deformación (véase la ecuación (2.11)-(2.14), de [4]), se deduce que $C_{ij} = C_{ji}$, entonces la matriz rigidez $[C]$ es simétrica teniendo ahora únicamente 6 constantes independientes. Como la matriz $[C]$ es de la misma forma de la matriz flexibilidad $[S]$, entonces $S_{ij} = S_{ji}$ y la matriz $[S]$ es simétrica.

Como veremos más adelante dada la simetría presente en el caso de los materiales ortotrópicos las matrices $[S]$ ó $[C]$ requieren únicamente 4 constantes independientes para su definición.

Las constantes de ingeniería: módulo de Young en las dos direcciones principales, (E_1 y E_2), módulo de corte, (G_{12}), y razón de Poisson, (ν_{12}), son definidas a partir de estados de esfuerzos y deformaciones simples, y son usadas para desarrollar la relación bidimensional esfuerzo-deformación para la lámina ortotrópica.

Consideremos una prueba de tensión uniaxial simple, que consiste en la aplicación de un esfuerzo normal longitudinal, σ_1 , a lo largo de la dirección del reforzamiento (dirección 1), mostrado en la figura 2(a), mientras que los otros esfuerzos son nulos. Los resultados experimentales observados en el rango lineal de las deformaciones en los ejes 12 pueden ser expresados en términos de las constantes de ingeniería como:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \sigma_1 / E_1 , \\ \varepsilon_2 &= - \nu_{12} \varepsilon_1 = - \nu_{12} \sigma_1 / E_1 , \\ \gamma_{12} &= 0 ,\end{aligned}\tag{1.3}$$

donde: E_1 = Módulo de Young asociado con la dirección 1, y,

$\nu_{12} = - \varepsilon_2 / \varepsilon_1$, es la razón de Poisson, que relaciona la deformación en la dirección 2 a la deformación en la dirección perpendicular 1 cuando el esfuerzo aplicado está en la dirección 1.

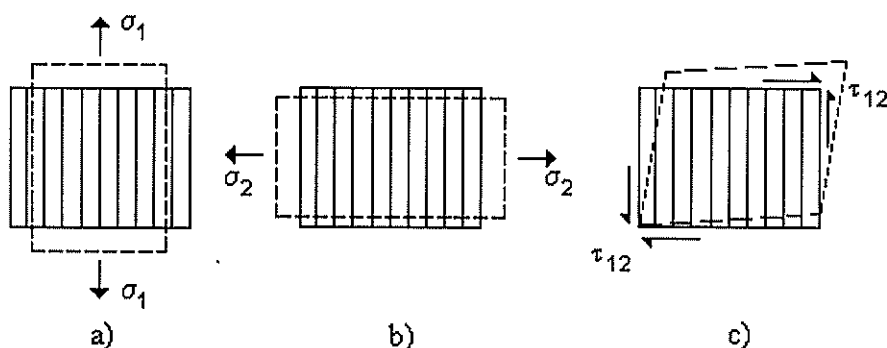


Figura 2
Estados de esfuerzos simples de la lámina

Siguiendo un procedimiento similar donde un esfuerzo transversal normal σ_2 y un esfuerzo cortante τ_{12} son aplicados, como se muestra en las figuras 2(b) y (c), se deducen las otras relaciones deformación-esfuerzo (véase la ecuación (2.20) y (2.21), de [4]). Aplicando la superposición de las deformaciones en sus correspondientes direcciones, y escribiendo estas deformaciones totales en forma de matriz, entonces la ley de Hooke, ecuación (1.2), queda como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.4)$$

Nótese que en general $E_1 \neq E_2$, y, $\nu_{12} \neq \nu_{21}$ (porque es un material ortotrópico), sin embargo, debido a la simetría de la matriz $-\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2$. Así mismo las deformaciones unitarias normales y cortantes no están acopladas entre sí, esto es, cuando se aplican esfuerzos normales a lo largo de las direcciones principales 1 ó 2, se producen solo deformaciones normales,

siendo las deformaciones cortantes iguales a cero; de la misma forma cuando se aplican esfuerzos cortantes solo producen deformaciones cortantes, siendo las deformaciones normales iguales a cero.

1.3. PREDICCIÓN DE LAS CONSTANTES DE INGENIERÍA EMPLEANDO ANÁLISIS MICROMECAÍNICO.

La determinación de las constantes de ingeniería del compuesto en términos de las propiedades mecánicas de cada componente, son llamadas relaciones micromecánicas, y son la base para predecir las constantes elásticas E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12} . Pruebas o datos experimentales son requeridos para conocer las propiedades de las componentes, es decir, módulo de Young de la fibra en las direcciones 1 y 2, y de la matriz, razón de Poisson de la fibra y la matriz, y, el módulo de corte de la fibra y de la matriz. Las ecuaciones micromecánicas están en función de las fracciones de volumen (ν_i) de cada componente, cuya suma debe completar el todo:

$$\sum_{i=1}^n \nu_i = 1,$$

donde $\nu_i = V_i / V_c =$ fracción de volumen de la i^{ma} componente,

$V_i =$ volumen de la i^{ma} componente, y,



BIBLIOTECA
I.C. ING.
M.A.A. LIMA

V_c = volumen total del compuesto.

En el caso tratado, la ecuación se reduce a:

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad , \quad (1.5)$$

donde v_f , v_m y v_v son las fracciones de volumen de la fibra, matriz y el vacío respectivamente.

Módulo Longitudinal, E_1

Si el compuesto está sujeto únicamente a un esfuerzo normal longitudinal, véase la figura 2(a), aplicando equilibrio estático en la dirección 1, entonces la fuerza resultante es igual a la suma de las fuerzas actuando sobre la fibra y la matriz. Aplicando la ley de Hooke en una dimensión y asumiendo que las deformaciones son iguales en la fibra, matriz, y, compuesto a lo largo de la dirección 1, se obtiene la regla de las mezclas para el módulo longitudinal, [4]:

$$E_1 = E_{f1} v_f + E_m v_m \quad , \quad (1.6)$$

donde, E_{f1} es el módulo de Young de la fibra en la dirección 1, y, E_m , es el módulo de Young de la matriz. Esta ecuación predice una variación lineal del módulo longitudinal, E_1 , con la fracción de volumen de la fibra, v_f . Aunque simple en forma, la ecuación (1.6), concuerda bien con datos experimentales

(véase la figura 3.4(b) de [4]) y es una ecuación útil de diseño, como lo demuestra su uso en las Reglas de la Sociedad de Clasificación Bureau Veritas, [2]. Se ha encontrado que mientras menor es el diámetro de la fibra, mejor la concordancia entre la regla de las mezclas y los resultados experimentales.

Módulo Transversal, E_2

Si el compuesto está sujeto a un esfuerzo normal transversal, entonces por la compatibilidad geométrica, el desplazamiento transversal total es igual a la suma de los desplazamientos transversales en la fibra y la matriz, véase la figura 2(b). Aplicando la ley de Hooke en una dimensión y asumiendo que los esfuerzos en la fibra, matriz y compuesto son iguales, se obtiene la regla inversa de las mezclas para el módulo transversal:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_{f2}} + \frac{v_m}{E_m}, \quad (1.7)$$

donde, E_{f2} es el módulo de Young de la fibra en la dirección 2. En la deducción de la ecuación anterior, se asume que los esfuerzos son iguales en la fibra, matriz, y, compuesto. Usando la ecuación de energía de deformación [4], se comprueba que ésta asunción no es válida, sin embargo la regla inversa de las mezclas se usa como punto de partida, porque la curva tiene la

tendencia correcta, aunque los "datos experimentales quedan por encima de la curva teórica", [4].

Razón de Poisson, ν_{12}

Una formulación para la razón de Poisson puede ser encontrada usando un procedimiento similar al empleado para el cálculo del módulo longitudinal, y, el resultado es otra regla de mezclas:

$$\nu_{12} = \nu_{f12} U_f + \nu_m U_m \quad , \quad (1.8)$$

donde ν_{f12} = es la razón de Poisson de la fibra, y,

ν_m = es la razón de Poisson de la matriz



BIBLIOTECA
1965, 1966,
MADRID

Se ha encontrado que esta ecuación es razonablemente válida, como lo demuestra su uso en las Reglas de la Sociedad de Clasificación Bureau Veritas, [2], porque concuerda bien con datos experimentales, [4].

Módulo de Corte, G_{12}

Una formulación para el módulo de corte puede ser derivada usando un procedimiento similar al empleado para el cálculo del módulo transversal, y, el resultado es otra regla inversa de mezclas:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_{f12}} + \frac{v_m}{G_m}, \quad (1.9)$$

donde G_{f12} = módulo de corte de la fibra en el plano 12, y,

G_m = módulo de corte de la matriz.

Esta ecuación no es completamente correcta, porque los esfuerzos cortantes no son iguales en la fibra, matriz, y, compuesto, como se analizó para el cálculo del módulo transversal, sin embargo dado su simplicidad será considerada en los cálculos desarrollados posteriormente.

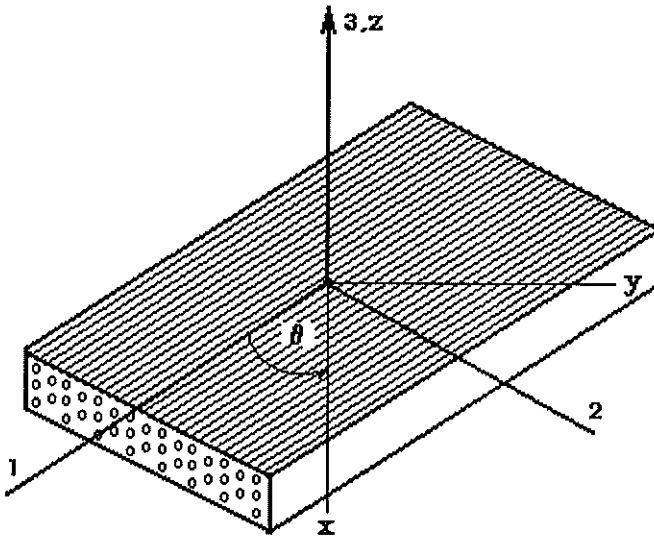


Figura 3
Lámina ortotrópica con un sistema de coordenadas principales (1,2,3) y no principales (x,y,z).

1.4. DEPENDENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS RESPECTO DE LA ORIENTACIÓN DE LOS EJES PRINCIPALES.

Las constantes de ingeniería de la lámina pueden ser transformadas desde los valores referidos a los ejes principales 12 (filamentos de la fibra orientados en la dirección principal de la lámina), a las correspondientes a ejes no principales xy (filamentos orientados en cualquier dirección θ), como se muestra en la figura 3.

La deducción de las propiedades mecánicas (E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy}) se detallan en el Apéndice 1. Esto es, aislando una porción de la lámina orientada un ángulo θ , respecto de la orientación de la fibra y aplicando equilibrio estático, se obtiene:

$$\{\sigma\}_{12} = [T] \{\sigma\}_{xy} ,$$

donde, $[T]$ es la matriz transformación del sistema de coordenadas 12 al sistema xy . Igual procedimiento se sigue con las deformaciones, entonces:

$$\{\varepsilon\}_{xy} = [T]^{-1} \{\varepsilon\}_{12} ,$$

y, de la ecuación (1.2):

$$\{\varepsilon\}_{12} = [S] \{\sigma\}_{12} ,$$

entonces:



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

$$\{\varepsilon\}_{xy} = [S^1] \{\sigma\}_{xy} , \quad (1.10)$$

que es la Ley de Hooke para un sistema de coordenadas no principales, donde, $[S^1] = [T]^{-1} [S] [T]$, es la matriz flexibilidad.

El módulo de Young, E_x , asociado con la carga uniaxial en la dirección x está definido como $E_x = \sigma_x / \varepsilon_x$, donde la deformación ε_x fue encontrada al sustituir las condiciones de esfuerzos, $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$, en la ecuación (1.10), entonces, [4]:

$$E_x = \frac{1}{\frac{1}{E_1} c^4 + \frac{1}{E_2} s^4 + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2} , \quad (1.11)$$

donde E_1 y E_2 son los módulos de elasticidad en la dirección 1 y 2, G_{12} es el módulo de corte, ν_{12} es la razón de Poisson, $s = \sin \theta$, y , $c = \cos \theta$.

En el Apéndice de este trabajo se desarrolló un proceso similar y se obtuvieron las relaciones que se describen a continuación. Para el módulo de elasticidad, E_y , asociado con la carga uniaxial en la dirección y , las condiciones de esfuerzos son $\sigma_y \neq 0$, $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$, está definido como:

$$E_y = \frac{1}{\frac{1}{E_1} s^4 + \frac{1}{E_2} c^4 + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2}, \quad (1.12)$$

El módulo de corte, G_{xy} , con las condiciones de esfuerzos, $\tau_{xy} \neq 0$, $\sigma_x = \sigma_y = 0$, está definido como:

$$G_{xy} = \frac{1}{\left[\frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} + \frac{4\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] 2s^2 c^2 + \frac{1}{G_{12}} (c^4 + s^4)}, \quad (1.13)$$

Y la razón de Poisson, ν_{xy} , con las condiciones de esfuerzos $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ está definido como:

$$\nu_{xy} = -\frac{\left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2 - \frac{\nu_{12}}{E_1} (c^4 + s^4)}{\frac{1}{E_1} c^4 + \frac{1}{E_2} s^4 + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2}, \quad (1.14)$$

A continuación se analizará la variación de las propiedades mecánicas: E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy} , cuando los filamentos de la fibra están orientados a 0° (el eje x coincide con el eje 1, y, el eje y coincide con el eje 2), y, a 90° (el eje x coincide con el eje 2, y, el eje y coincide con el eje 1). Utilizando las ecuaciones (1.11) - (1.14), se obtienen los siguientes resultados:

| θ | E_x | E_y | G_{xy} | ν_{xy} |
|------------|-------|-------|----------|------------|
| 0° | E_1 | E_2 | G_{12} | ν_{12} |
| 90° | E_2 | E_1 | G_{12} | ν_{12} |

Tabla 1
Dependencia de las Propiedades Mecánicas con respecto de la orientación.

La dependencia direccional implícita en las ecuaciones (1.11)-(1.14) va a ser comprobada como parte del trabajo experimental de ésta tesis.

1.5. ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE LA LAMINA

La resistencia es definida como “el valor del esfuerzo que causa la falla del material”. La resistencia de la lámina depende tanto del esfuerzo de rotura de la matriz como de la fibra (que actúa de refuerzo). En este trabajo solo se analizará la resistencia longitudinal de materiales compuestos, debido a limitaciones en el equipo disponible.

Resistencia Longitudinal, S_L

El análisis es desarrollado basándose en las siguientes asunciones:

- (1) igualdad de resistencia en todas las fibras,
- (2) comportamiento lineal elástico por debajo de la falla, y,
- (3) las deformaciones longitudinales son iguales en la fibra, matriz, y compuesto.



BIBLIOTECA
FAC. CAC.
MEXICO

En este trabajo se considera que el compuesto falla debido a que la fibra o la matriz, alcanzan sus niveles de esfuerzos de ruptura; dichos valores pueden determinarse en forma experimental durante la prueba de los componentes en forma independiente.

En la figura 4 se presenta la relación lineal elástica entre el esfuerzo y la deformación unitaria, tanto para la resina como para la fibra, hasta el punto de rotura. La pendiente de cada recta representa el módulo de Young de dicho componente. Cuando una probeta de material compuesto es sometida a tensión simple, la relación entre esfuerzo y deformación, estará representada por una tercera recta, con pendiente igual al módulo de Young del compuesto; la "regla de las mezclas" establece que dicho parámetro estará entre los valores de cada componente del compuesto. En la figura mencionada, se ha presentado el caso en que la matriz falla con valores de esfuerzo y deformación unitaria inferiores (e_{m1} , s_{m1}) a los de la fibra (e_{f1} , s_{f1}), de manera que cuando el compuesto sometido a tensión simple alcanza una deformación unitaria e_{m1} , el nivel de esfuerzo en la matriz será s_{m1} , por tanto habrá alcanzado su límite de resistencia, y la probeta sufrirá una primera falla. Sin embargo, todavía puede incrementarse la carga sobre la probeta, debido que la fibra no ha alcanzado su esfuerzo de rotura. Esto va a suceder cuando la deformación unitaria sea e_{f1} .

La resistencia longitudinal del compuesto, S_L (esfuerzo promedio al momento de la falla), se la puede entonces analizar empleando la regla de las mezclas para esfuerzos longitudinales, la cual viene dada por la siguiente relación (ecuación (3.18), de [4]):

$$\sigma_c = \sigma_f \nu_f + \sigma_m \nu_m , \quad (1.15)$$

donde: σ_c = esfuerzo longitudinal promedio del compuesto (F/A),

σ_f = esfuerzo longitudinal desarrollado por la fibra, y,

σ_m = esfuerzo longitudinal desarrollado por la matriz.

Como se había explicado antes, el esfuerzo longitudinal en la matriz ha alcanzado el valor de rotura, S_{m1} , mientras que el esfuerzo longitudinal en la fibra ha alcanzado un valor igual al producto de la deformación unitaria (común para compuesto, fibra y matriz, de acuerdo con la asunción (3)) por el módulo de Young de la fibra $S_{fm1} = E_{fl} e_{m1}$, y, el esfuerzo longitudinal del compuesto alcanza el valor de rotura, S_L , entonces la ecuación (1.15), se convierte en:

$$S_L = S_{fm1} \nu_f + S_{m1} \nu_m \quad (1.16)$$

donde S_{fm1} es el valor del esfuerzo en la fibra bajo una deformación unitaria igual a e_{m1} .

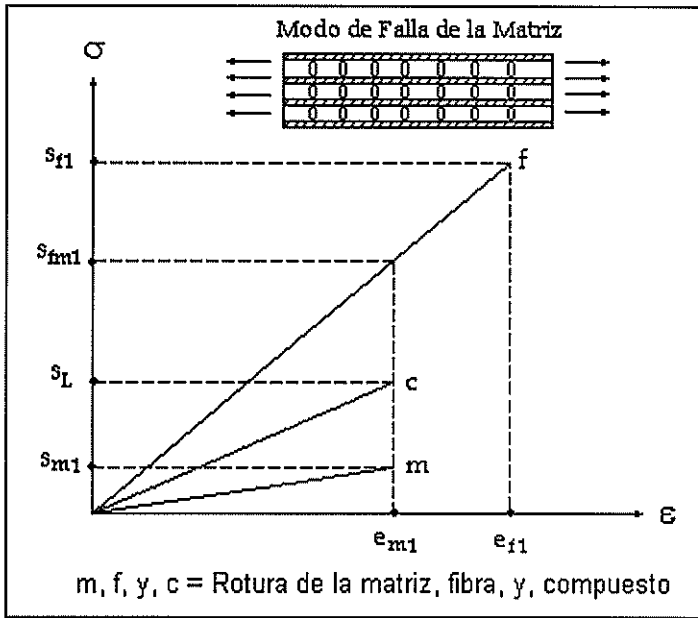


Figura 4

Curva esfuerzo-deformación para la fibra, matriz, y, compuesto cuando falla la matriz

1.6 RESUMEN DE LAS FÓRMULAS A COMPROBARSE

Un resumen de las formulaciones teóricas que sirven para analizar materiales compuestos, y que han sido presentadas en este capítulo, se detallan en la Tabla 2. La validez de estas expresiones serán analizadas y comparadas con los resultados experimentales en el Capítulo 3.



BIBLIOTECA
NAC. INC.
MEXICO

| Basado en: | Variable | Fórmula |
|--|---|---|
| Suma de fracción de Volumen. | Fibra, Matriz y Vacío | $v_f + v_m + v_v = 1$ |
| Pruebas experimentales fibra y matriz. | Mod. de Young, de Corte y Poisson | $E_{f1} \quad E_{f2} \quad E_m \quad G_{f12} \quad G_m$ $v_{f12} \quad v_m$ |
| Regla de las mezclas | Módulo Longitudinal dirección 1 | $E_1 = E_{f1} v_f + E_m v_m$ |
| Regla inversa de las mezclas | Módulo Longitudinal dirección 2 | $\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_{f2}} + \frac{v_m}{E_m}$ |
| Regla de las mezclas | Razón de Poisson | $v_{12} = v_{f12} v_f + v_m v_m$ |
| Regla inversa de las mezclas | Módulo de Corte | $\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_{f12}} + \frac{v_m}{G_m}$ |
| Análisis macromecánico | Módulo Longitudinal en la dirección x | $E_x = \frac{1}{\frac{1}{E_1} c^4 + \frac{1}{E_2} s^4 + \left[-\frac{2v_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2}$ |
| Análisis macromecánico | Módulo Longitudinal en la dirección y | $E_y = \frac{1}{\frac{1}{E_1} s^4 + \frac{1}{E_2} c^4 + \left[-\frac{2v_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2}$ |
| Análisis macromecánico | Módulo de Corte en la dirección xy | $G_{xy} = \frac{1}{\left[\frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} + \frac{4v_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] 2s^2 c^2 + \frac{1}{G_{12}} (c^4 + s^4)}$ |
| Análisis macromecánico | Razón de Poisson en la dirección xy | $v_{xy} = -\frac{\left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2 - \frac{v_{12}}{E_1} (c^4 + s^4)}{\frac{1}{E_1} c^4 + \frac{1}{E_2} s^4 + \left[-\frac{2v_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2}$ |
| Regla de las mezclas | Resistencia Longitudinal | $S_L = S_{fm1} v_f + S_{m1} v_m$ |

Tabla 2
Resumen de las fórmulas teóricas empleadas para determinar las propiedades del compuesto.

CAPITULO 2

TRABAJO EXPERIMENTAL

En este capítulo se van a describir los métodos que se usaron para llevar a cabo las pruebas mecánicas. En el primer capítulo se puso énfasis en el desarrollo de un modelo analítico para encontrar las propiedades mecánicas básicos del material compuesto. Algunos de los aspectos del comportamiento mecánico de estos materiales son muy complejos, y es posible que la arquitectura propiamente dicha del modelo analítico sea cuestionable, de manera que un proceso experimental puede ser una solución aceptable a este comportamiento. De hecho mucho de lo que hoy conocemos sobre la especial naturaleza del comportamiento de los materiales compuestos ha sido derivado de observaciones experimentales.

La tecnología asociada con las pruebas del material compuesto requiere de sofisticados equipos para realizar los ensayos, los cuales van asociados con una metodología adecuada para las pruebas. Estos métodos están recopilados por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, "American Society For Testing and Materials" (ASTM), [1], que es el libro guía seguido en el presente trabajo. Se realizaron tres tipos de pruebas: tracción, corte, y flexión, para tres tipos de fibras naturales, ya sea como componentes

separados ó como material compuesto. Las fibras fueron caña guadua, yute y cabuya, y como matriz común una resina epóxica.

El procedimiento experimental que se siguió para la obtención de las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales se ilustra en la siguiente figura:

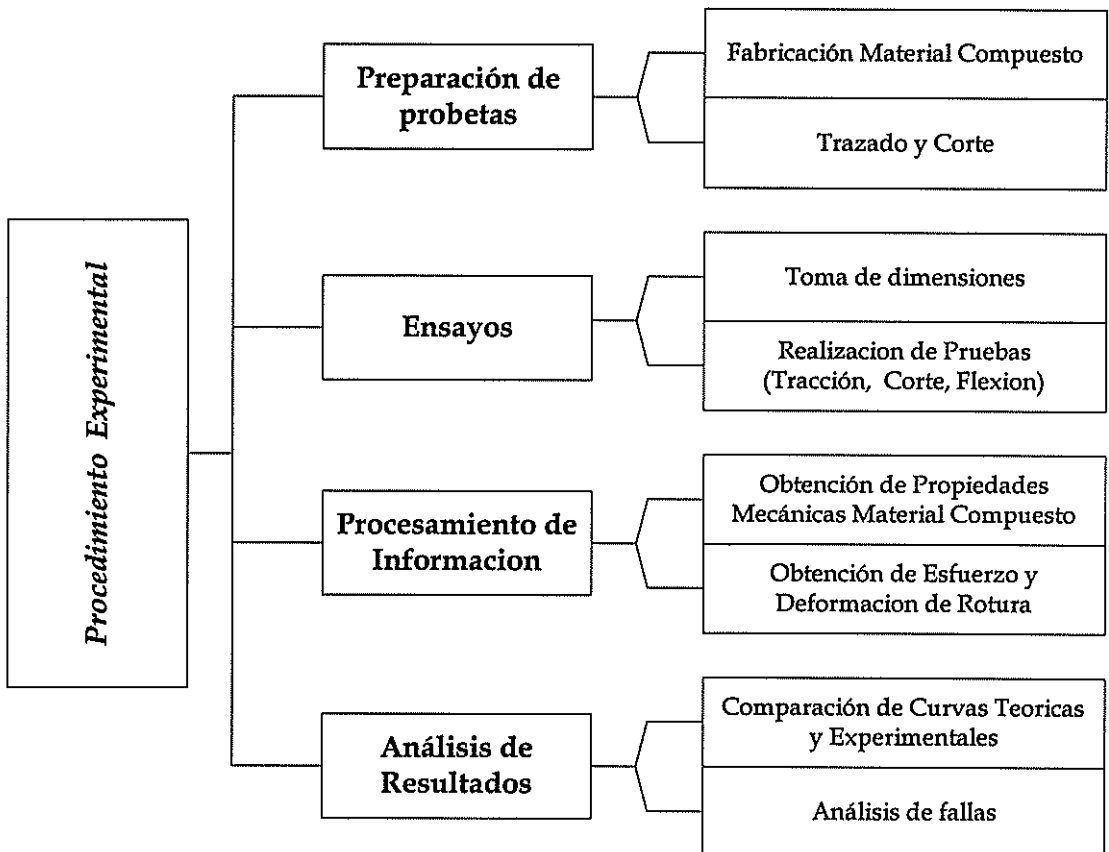


Figura 5
Secuencia seguida para el desarrollo del procedimiento experimental



2.1. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

Se va a describir el proceso de preparación de probetas y el desarrollo de ensayos. Se incluye también un resumen de las mediciones experimentales obtenidas.

La tabla 3 muestra los ensayos desarrollados, incluyéndose además la propiedad que se pretende determinar y el equipo ó laboratorio utilizado para el efecto.

| Prueba | Equipo | Unidad Académica | Propiedad que se obtuvo | Referencia de ASTM |
|----------|--|---|-----------------------------|--------------------|
| Densidad | Balanza de precisión 0.0001 mg - 120 gr | Laboratorio de Ictiología Fac. Ing. Marítima | v_f, v_m | C 271 - 61 |
| Fibras | Máquina de ensayo universal | Laboratorio de Sólidos Fac. Ing. Mecánica | $E_t, \sigma_t, \epsilon_u$ | D 3379 |
| Tensión | Máquina de ensayo universal | Laboratorio de Sólidos Fac. Ing. Mecánica | σ_t, ϵ_u | D 3039 |
| Corte | Máquina de ensayo universal | Laboratorio de Sólidos Fac. Ing. Mecánica | G_{xy} | D 4255 |
| Flexión | Dispositivo para prueba de flexión | Laboratorio de Vibraciones Fac. Ing. Marítima | v_{xy}, E_x, E_y | D 790 |

Tabla 3

Ensayos desarrollados, con la propiedad encontrada y lugar donde se realizó la prueba

En la tabla anterior:

E_f : Módulo de Young de la fibra

G_{xy} : Módulo de corte en dirección xy

σ_r : Esfuerzo de rotura de la fibra

ϵ_u : Deformación última

ν_{xy} : Relación de Poisson entre las direcciones x y y

ν_f : Relación Porcentual del Volumen de la fibra

ν_m : Relación Porcentual del Volumen de la matriz

Las dos primeras, esto es, la prueba de las fibras y de densidad, se refieren a los componentes que formarán parte del material compuesto, y, las tres pruebas restantes: tensión, corte y flexión, se refieren a las pruebas efectuadas al material compuesto.

Con las pruebas de los componentes se determinaron el módulo de Young y el esfuerzo de rotura de la resina, y, la densidad el módulo de Young y el esfuerzo de rotura de las fibras, indispensable para llegar a determinar la relación porcentual del volumen de fibra y de matriz presentes en la mezcla resina - fibra.

Las pruebas de corte y flexión nos permitieron determinar las constantes de ingeniería del material. Las pruebas de tensión y corte sirvieron también para realizar el análisis de la resistencia del compuesto.

2.2. PREPARACIÓN DE PROBETAS

Fabricación del Material Compuesto

Para obtener uniformidad en las probetas, se dividió el proceso en cuatro pasos: proceso previo, preparación de la resina, formación de la plancha, y por último el proceso de desmoldado.

- a) **Proceso Previo.-** Este comienza con la limpieza de la plancha de fórmica sobre la cual se fundirá la plancha; para esto se utilizó **estireno monómero**, el cual remueve las impurezas de la fórmica. Luego se procedió a lavar la fórmica con agua y detergente y se dejó secar por unos minutos. Se procedió entonces a aplicar cera sobre la superficie y colocar cinta adhesiva para delimitar los límites de la plancha a fundir. Luego se cubrió la superficie delimitada con **desmoldante** y se dejó secar por unos minutos, tal como se muestra en las fotos 1 y 2 respectivamente.



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

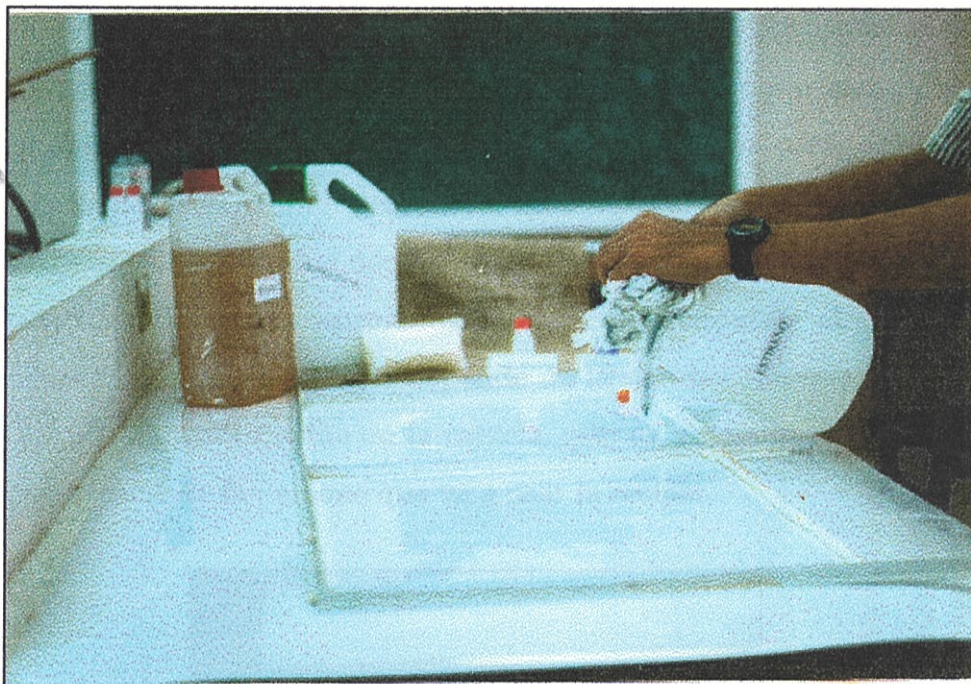


Foto 1

Limpeza y delimitación de la superficie que luego servirá para formar la plancha de material compuesto

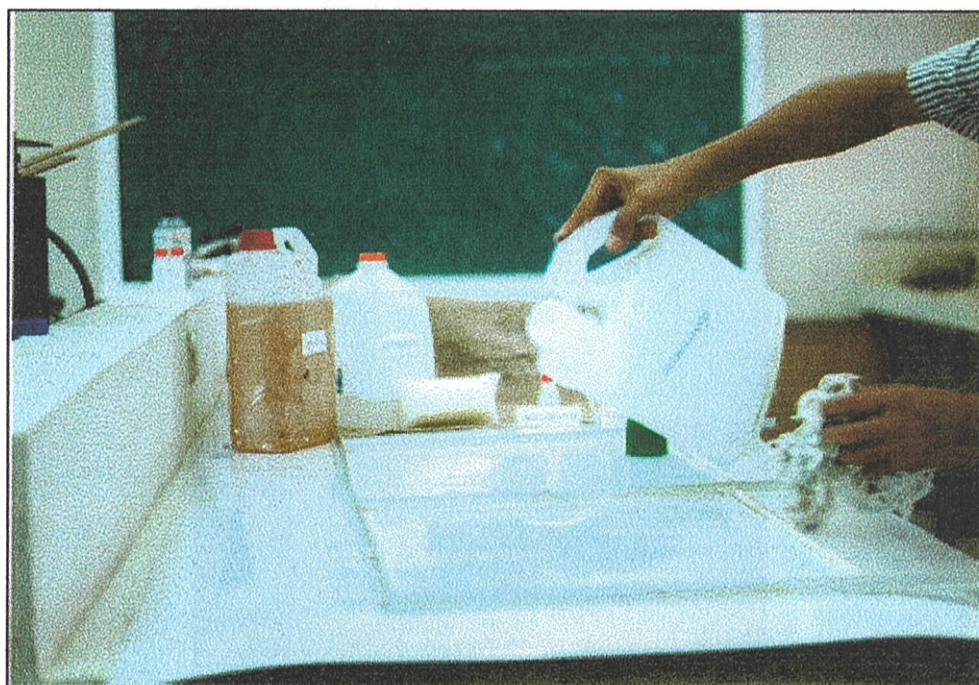


Foto 2

El desmoldante es aplicado sobre la superficie delimitada para evitar que la resina y la fórmica se adhieran entre si

b) Preparación de la Resina.- En un galón de ésta se agregaron ocho (8) gramos de **Cobalto al 10%**; se revolvió para que la mezcla sea uniforme. Luego se agregó **Estireno Monómero** para diluir la resina hasta el punto deseado. Para aplicar la resina sobre la plancha de fórmica fue necesario agregar unas gotas (de 5 a 6 gotas por litro de resina aproximadamente) de **Peróxido al 50%**. El número de gotas a agregar depende de la rapidez con que se desee que el catalizador actúe en la mezcla, esto es, está supeditado a la experiencia de la persona que va a usar la resina.

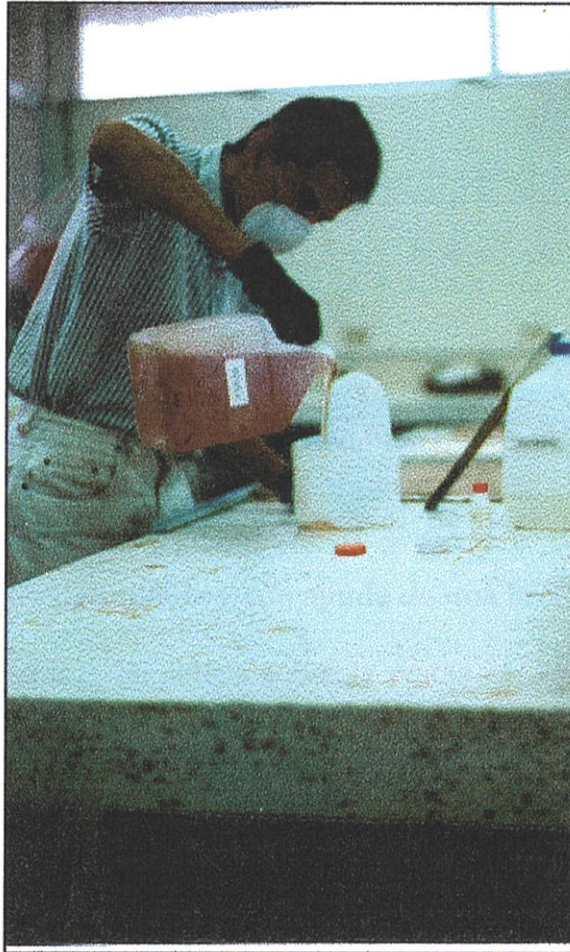


Foto 3

La resina previamente mezclada con cobalto, se vierte en un recipiente limpio y seco

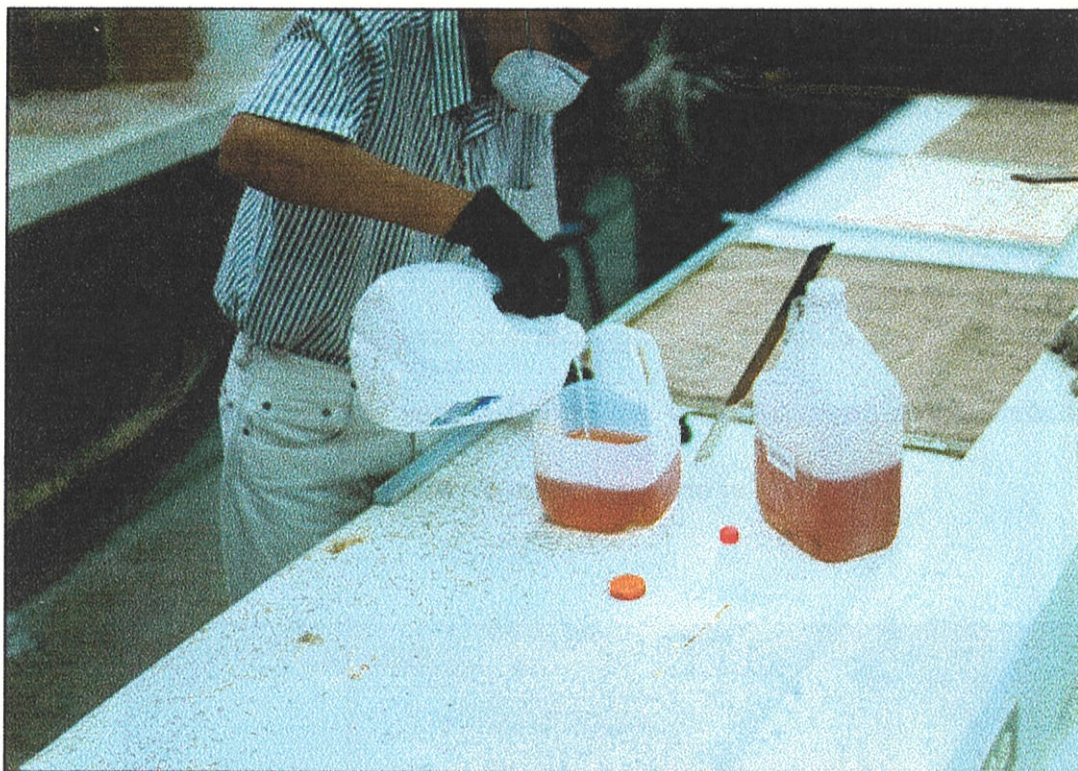


Foto 4

Se agrega estireno a la resina para diluirla, luego se le añadirá el peróxido

c) **Construcción de la Plancha.-** Se tiene lista ya la superficie sobre la cual se va a fundir la plancha y la resina. Se vierte la resina sobre la superficie antes delimitada y con ayuda de una brocha se esparce de manera uniforme. Se coloca sobre la resina esparcida la malla de fibra procurando que ésta se embeba completamente. Se aplica luego una segunda mano de resina para cubrir imperfecciones, se cubre la plancha fundida con el plástico **Maylo**, y con ayuda de una espátula se sacaron los excesos de resina y de aire hacia los



extremos de la plancha. Finalmente se dejó secar de 3 a 4 horas aproximadamente.

La plancha se dejó secar bajo techo, sin una exposición directa del sol, puesto que si esto ocurre la plancha fundida por efecto de la temperatura y del sol se deformará; esta distorsión se presenta en forma de ondulaciones a todo lo largo de la plancha.



Foto 5

Se esparce uniformemente la resina sobre la superficie que luego formará la plancha de material compuesto



Foto 6

La tela de Yute es colocada sobre la resina para que se embeba completamente



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARÍTIMA



Foto 7

Aplicando una segunda mano de resina para cubrir imperfecciones



Foto 8

Se cubre la plancha con el maylo y se eliminan los excesos de resina y de aire

d) Para Desmoldar la Plancha.- Transcurrido el tiempo de secado, la resina se transforma en un material rígido y relativamente fuerte, en este momento se estará en condiciones de desmoldar la plancha, primero del plástico Maylo, y luego de la fórmica. El producto es una plancha de material compuesto uniforme por ambos lados.



Foto 9
Plancha de material compuesto Cabuya - Resina

- e) **Para el Material tipo Sanduche.-** el proceso previo de preparación es el mismo, la única diferencia está en el momento de formar la plancha puesto que hay que hacerlo por ambos lados del material que se está usando como material núcleo ("core"). De no hacerlo así, al secarse se obtendrá una plancha deforme como se muestra en la foto 11.

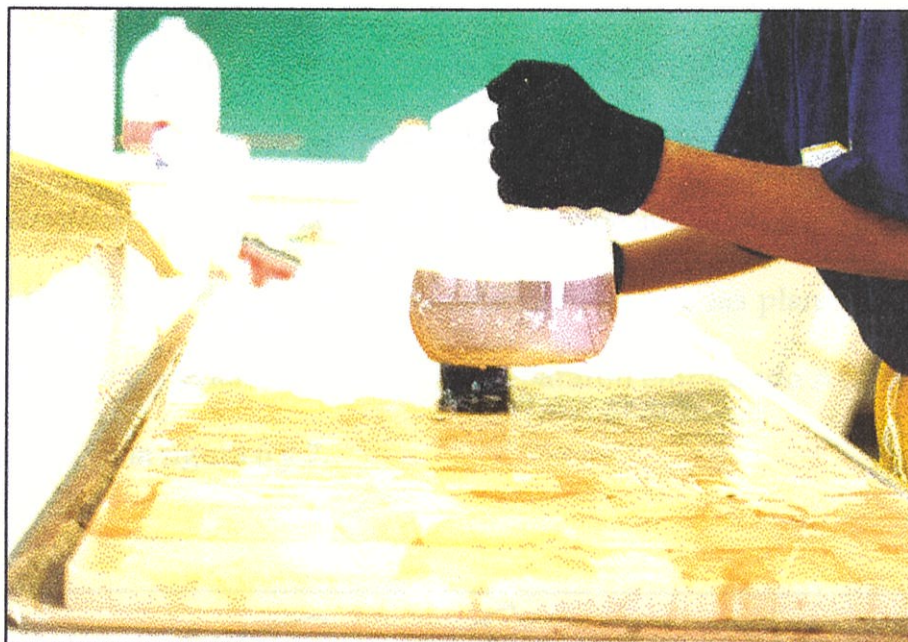


Foto 10

Elaboración del material sandwich, se puede apreciar la tela de yute en la parte inferior y sobre ella, la balsa cubierta con resina

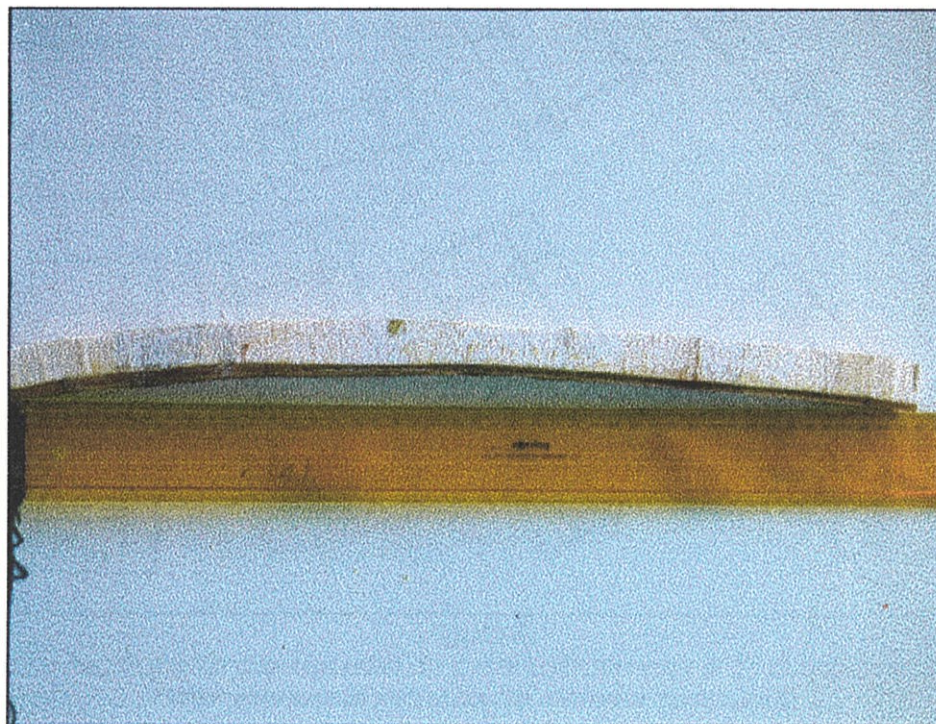


Foto 11

Material sandwich Resina + Cabuya + Balsa, se puede apreciar la deformación de la probeta respecto de la regla, esto debido a que se fundió separadamente la una capa de la otra

Corte y Trazado de probetas

Se procedió a marcar la plancha con la ayuda de un plano que contiene las dimensiones de las probetas en escala real, que fueron utilizadas en las diferentes pruebas programadas. Los planos mencionados se hicieron con la idea de aprovechar de una mejor manera cada una de las planchas, y evitar desperdicio de material. Los planos se prepararon empleando AUTOCAD, y se muestran en la figura 6 y 7.

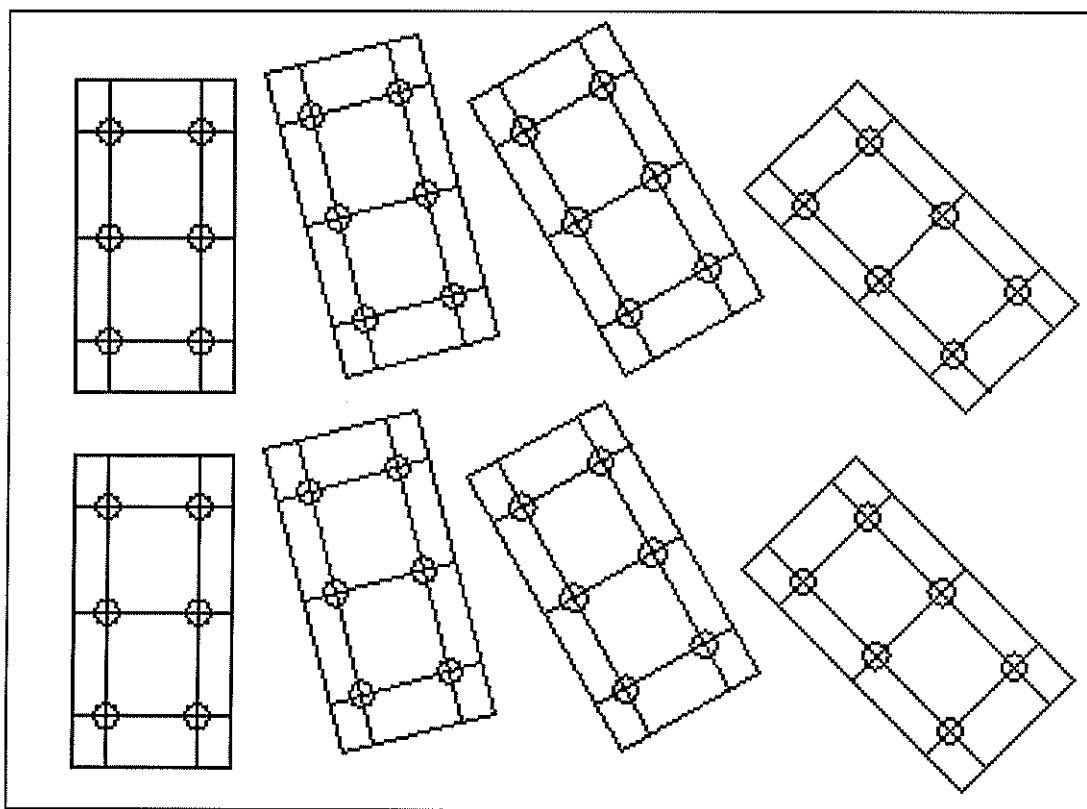


Figura 6

Plano de las probetas para prueba de corte utilizado con el fin de aprovechar de mejor manera la plancha de material compuesto

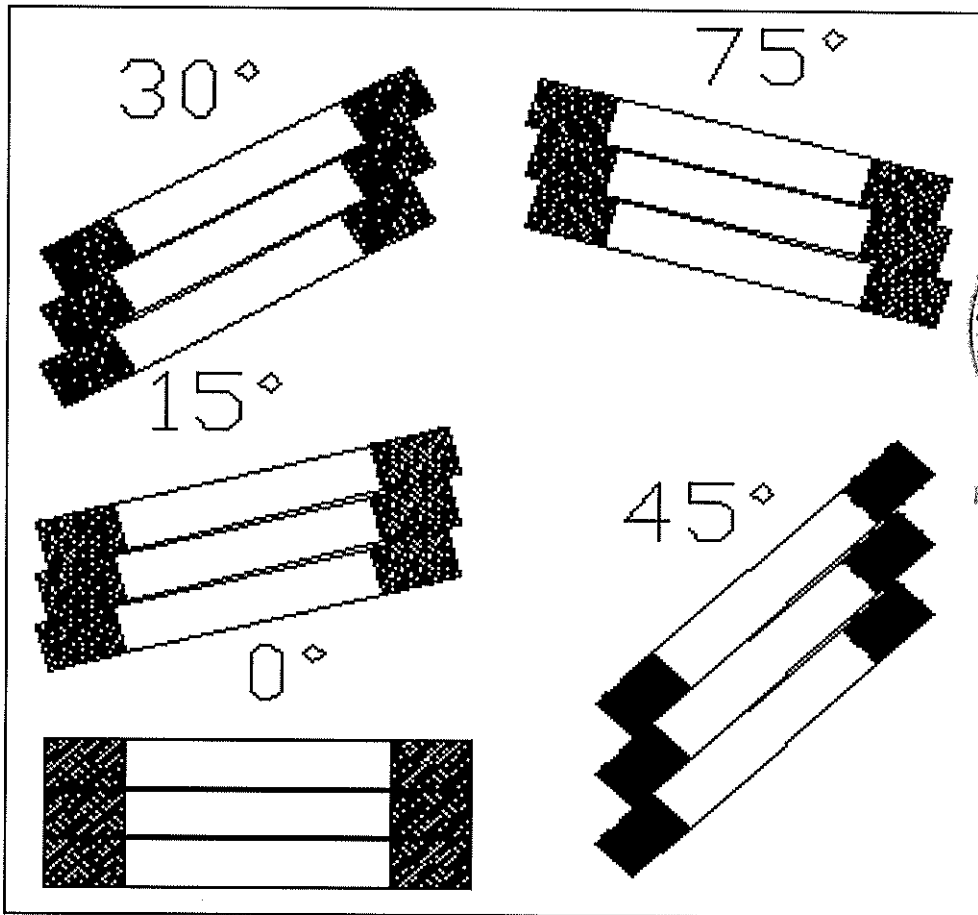


Figura 7
Plano de las probetas para prueba de tensión

En cada plancha se marcaron tres (3) probetas en cada dirección; las direcciones varían desde 0 a 90 grados, con intervalos de 15 grados cada uno. Esto es, se tuvieron un juego de veintiún (21) probetas por plancha fundida. Con ayuda de una sierra caladora, tal como se muestra en al foto 12, se procedió a cortar sobre lo marcado; el acabado final se lo da con una lija de mano para eliminar remanentes en los bordes.

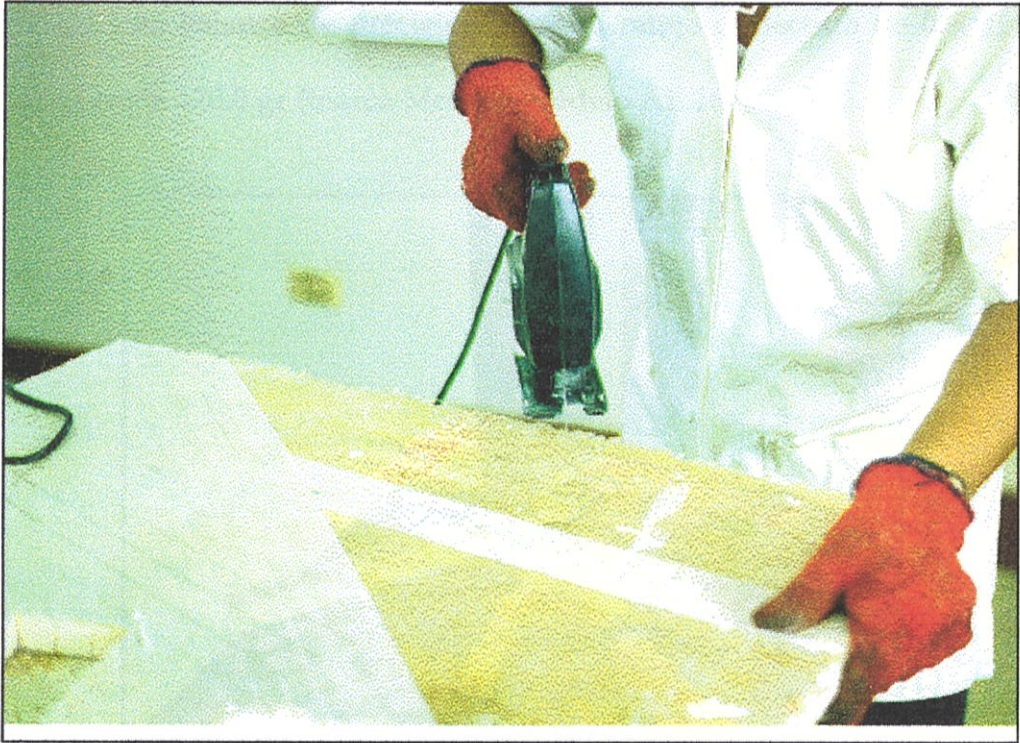


Foto 12

Corte del material tipo sanduche, nótese la demarcación previa de la plancha

Toma de Dimensiones y Pesado de Probetas

Las dimensiones principales: longitud, ancho, espesor y peso, son registradas, tal como se muestra en la fotos 13 y 14 respectivamente, para cada una de las probetas, para ello se necesitará del siguiente equipo:

- (1) Un medidor de espesores con un rango de 0 - 10 mm con precisión de 0.01 mm, provisto de un arco rígido y una superficie de medición plana micropulida para asegurar precisión (marca Mitutoyo, modelo 7301).
- (2) Un calibrador Vernier con una capacidad de medida sobre los 30.0 mm.

- (3) Una balanza de precisión con un rango de lectura de 0.0001 mg hasta 120.0 gr (marca Mettler, modelo AE 166).

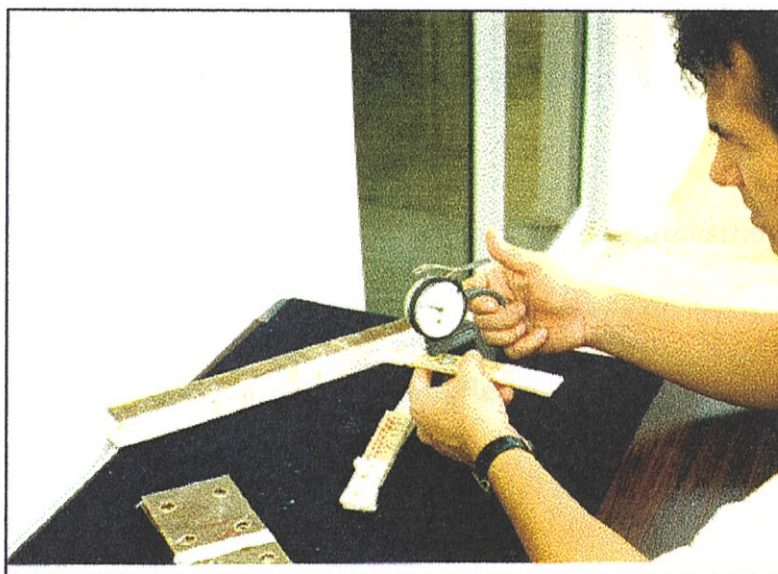


Foto 13

Toma de dimensiones con ayuda del medidor de espesores

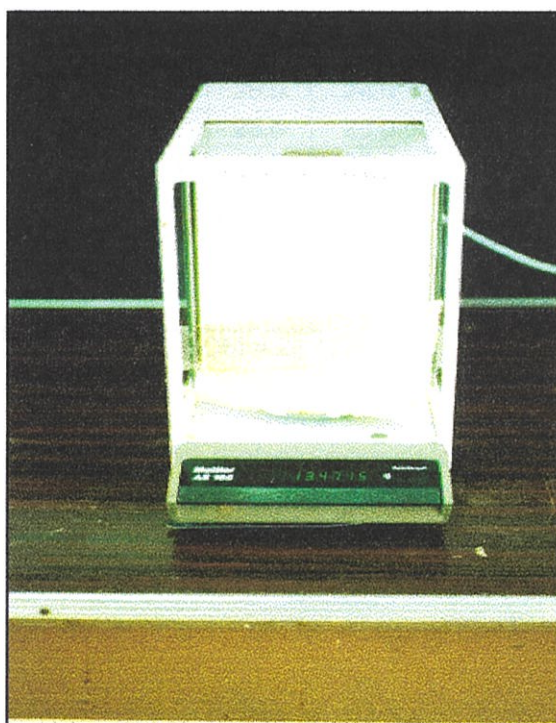


Foto 14

Balanza analítica utilizada para registrar el peso



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

Por defectos de construcción, el espesor de las probetas no es uniforme, razón por la que se tomaron varias medidas y luego se promediaron, se le asigna entonces un número a la probeta para identificarla. La longitud, ancho y espesor son medidos en milímetros, y el peso en kilogramos.

Los resultados son presentados en una tabla donde se muestran los valores registrados y el promedio obtenido para cada probeta. En la tabla 4 se presentan resultados típicos del compuesto Resina - Cabuya.

| 0 Grados | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Longitud | | | Ancho | | | Espesor | | |
| # 1 | # 2 | # 3 | # 1 | # 2 | # 3 | # 1 | # 2 | # 3 |
| 127.5 | 127.0 | 127.0 | 25.5 | 26.0 | 24.0 | 3.58 | 3.40 | 4.05 |
| 127.0 | 127.0 | 127.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 3.82 | 3.50 | 3.52 |
| 126.5 | 127.5 | 126.5 | 26.0 | 24.5 | 25.0 | 3.71 | 3.34 | 3.11 |
| 127.0 | 127.2 | 126.8 | 26.0 | 25.0 | 23.5 | 3.46 | 3.08 | 3.10 |
| | | | 26.0 | 25.5 | 23.5 | 3.40 | 3.33 | 3.07 |
| | | | 25.90 | 25.30 | 24.20 | 3.63 | 3.68 | 3.30 |
| | | | | | | 3.600 | 3.388 | 3.358 |
| PROM = 127.50 | | | PROM = 25.13 | | | PROM = 3.449 | | |

Tabla 4
Promedio de medidas para una probeta para ensayo de tensión a 0 grados

La máxima variación en espesor se la obtuvo en la probeta de cabuya preparada para la prueba de tensión, y esta tiene un valor de 1.78 mm aproximadamente.

2.3. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE VOLUMÉTRICO

Esta prueba se realizó para determinar el porcentaje de volumen de fibra, v_f y de matriz, v_m , presentes en el material compuesto, según el método descrito por ASTM C 271 - 61 (Reapproved 1988).

Para efectuar la prueba se requirió del siguiente equipo:

- (1) Balanza de precisión con un rango de lectura de 0.0001 mg hasta 120.0 gr (marca Mettler, modelo AE 166)
- (2) Un medidor de espesores con un rango de 0 - 10 mm y precisión de 0.01 mm, provisto de un arco rígido y una superficie de medición plana micropulida para asegurar precisión, a una presión de 1.47 Nw (Marca Mitutoyo, modelo 7301).

Procedimiento Experimental:

- (a) Para la prueba se corto un espécimen de 10 x 10 cm de longitud (ver foto 15),
- (b) Su peso fue registrado,
- (c) Los componentes de la tela esto es los hilos longitudinales y transversales fueron separados,
- (d) Por separado su peso fue registrado,
- (e) Se tomó una muestra de hilos en forma aleatoria, y, se registró su longitud, peso y diámetro,

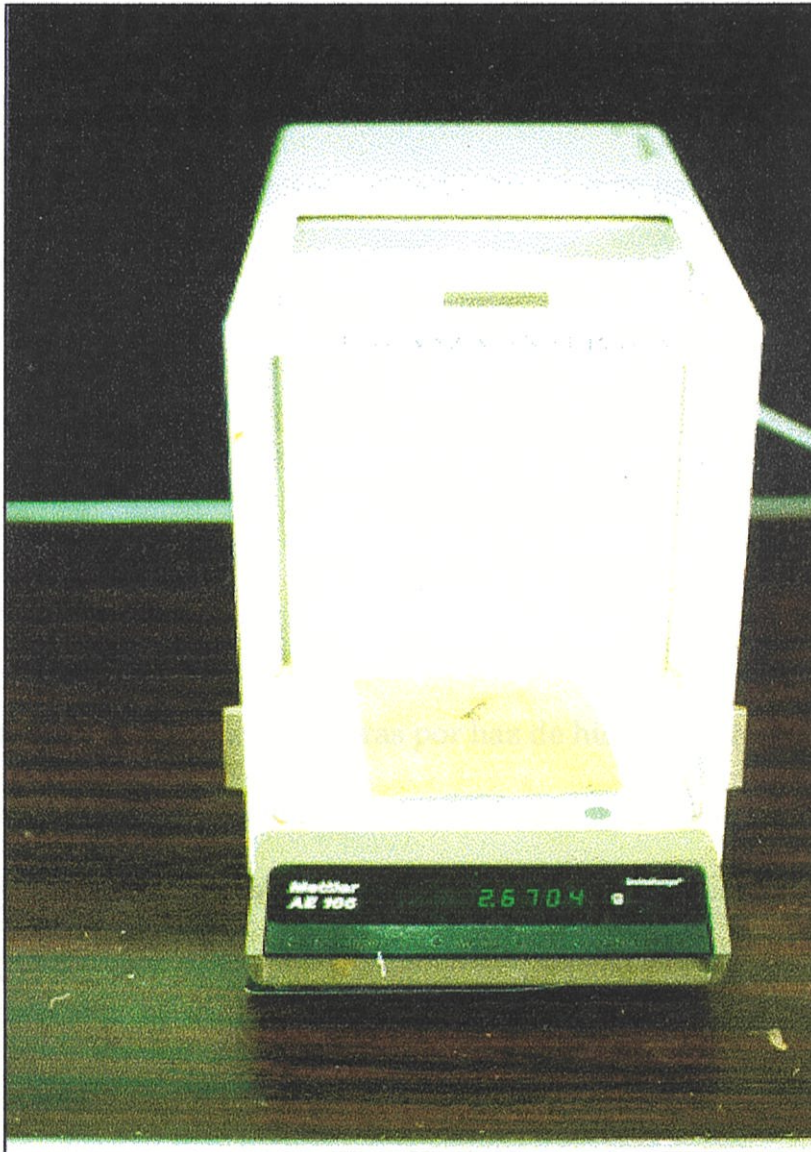


Foto 15

Pesaje de un espécimen de Cabuya de 10 x 10 cm de longitud

Con el diámetro promedio de las fibras y conociendo la longitud de estas, se obtuvo el volumen, y midiendo el peso de la fibra, la densidad de la muestra analizada se la obtiene a través del cuociente:

$$Wg^1/V .$$

Este fue el procedimiento seguido para encontrar la densidad de las fibras de cabuya y caña guadua, mientras que para las fibras de yute el procedimiento fue ligeramente diferente, puesto que las fibras del yute no son continuas esto es no poseen una longitud promedio típica, fue necesario encontrar otra forma para determinar la densidad de la fibra, a saber:

(f) Se repitieron los pasos anteriores hasta el punto (d)

(g) Se tomó un haz de hilos y, se contó el número promedio de fibras existentes en el haz,

Conocido entonces el número de fibras por haz de hilos existentes, y sabiendo el diámetro promedio de un hilo de yute, se determinó la densidad de un haz de hilo de yute. En las tablas 5 - 6 se muestran los valores típicos de densidad que se obtuvieron para la fibra del yute, cabuya, y caña guadua.

| Cálculo densidad de la fibra | | | |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Probetas de hilo de Yute | | | |
| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 |
| $\phi_{\text{Típico}}$ (mm) | 0.056 | 0.056 | 0.056 |
| L (mm) | 1000 | 1000 | 1000 |
| P (gr) | 0.0281 | 0.0389 | 0.0392 |
| No Fibras | 96 | 149 | 157 |
| Vol (mm ³) | 236.45 | 366.98 | 386.69 |
| ρ (gr/mm ³) | 1.188E-04 | 1.060E-04 | 1.014E-04 |

Tabla 5

Tabla que muestra los valores típicos obtenidos para el cálculo de densidad de la fibra de Yute

| Cálculo densidad de la fibra | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Probetas de hilo de Cabuya | | | | | | | |
| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 | Probeta No 4 | Probeta No 5 | Probeta No 6 | Probeta No 7 |
| ϕ (mm) | 0.21 | 0.1980 | 0.1748 | 0.1357 | 0.1650 | 0.1367 | 0.1337 |
| L (mm) | 200 | 200 | 200 | 150 | 200 | 250 | 200 |
| P (gr) | 0.0055 | 0.0047 | 0.0035 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0025 |
| ρ (gr/mm ³) | 7.94E-04 | 7.63E-04 | 7.30E-04 | 2.12E-03 | 9.12E-04 | 1.04E-03 | 8.91E-04 |

Tabla 6

Valores típicos obtenidos para el cálculo de densidad de las fibras de Cabuya y Caña Guadua

De acuerdo con lo descrito en el capítulo uno, se consideró para el cálculo de la densidad de la fibra lo que denominamos direcciones 1 y 2, donde la dirección 1 corresponde a la dirección del reforzamiento principal, mostrado en la figura 2 y la dirección 2 corresponde a la dirección perpendicular de aquella.

Con el peso de la tela de fibra obtenido en ambas direcciones, obtuvimos la razón de las fibras (r) en dirección 1 y 2:

$$r = \frac{\text{Peso de la fibra en direccion 1 ó 2}}{\text{Peso de la tela}}$$

Se obtuvo un promedio del diámetro de las fibras (ϕ), de la longitud (L) y, del peso (P), con estos valores promedio la densidad de la fibra (ρ) fue encontrada a través de la relación:

$$\rho = \frac{4 * P}{\pi * \phi^2 \cdot L}$$



La masa de la fibra en dirección 1 ó 2 se la obtuvo multiplicando la razón de las fibras (r) por el peso de la fibra (M_f):

$$m_f = M_f * r .$$

Se calculó el área de la fibra en dirección 1 y 2 (A_{f1}) a través del cociente entre el peso de la fibra (M_{f1}) y, la densidad (ρ) multiplicada por el largo de la probeta (L). Para encontrar el área de la fibra en dirección 2 (A_{f2}) se multiplicó por el ancho de la probeta (B) en lugar de (L):

$$A_f = \frac{m_f}{\rho_f * L} .$$

La razón de volumen en dirección 1 o 2 (v_f) se la obtuvo dividiendo el área de la fibra en dirección 1 o 2 (A_f) para el ancho de la probeta (B) multiplicado por el espesor (T) de esta; para el calculo de v_{f2} se multiplicó por la longitud de la probeta (L) en lugar de (B):

$$v_f = \frac{A_f}{B * T} .$$

De acuerdo con la ecuación (1.5) y asumiendo que el porcentaje de volumen de vacío del compuesto es despreciable, entonces la razón de volumen en la matriz (v_m) dirección 1 o 2 se obtuvo por:

$$v_m = 1 - v_f .$$

El número de fibras existentes en el haz de hilos no es constante y difiere en mucho unos de otros, razón por la que se optó por establecer un promedio, siendo esto una posible causa de error en la estimación de la densidad.

2.4. PRUEBA DE LAS FIBRAS

El esfuerzo último de tensión y el módulo de Young de una fibra sometida a carga longitudinal, puede ser determinada mediante el método descrito por ASTM D 3379 - 75 (Reapproved 1989)⁸¹. Debido a que el equipo disponible tiene características muy diferentes a las requeridas, fue necesario adaptar un dispositivo para este efecto, el cual se muestra en la figura 8.

La figura 9 se muestra las dimensiones de una probeta típica para esta prueba y, en la foto 16 se muestran dos probetas a escala real para pruebas de tensión de la fibra de caña guadua; la fibra se fija sobre un pedazo de papel el cual tiene un agujero en la parte central, el espécimen se sujeta a los extremos del agujero con pegamento y en los extremos de esta se coloca resina, la cual sirve para fijar la probeta a las mordazas; en la figura 8 se muestra un esquema del equipo utilizado, el cual está constituido por:

- Un soporte rígido
- Porta pesos y pesos
- Reloj comparador
- Base magnética

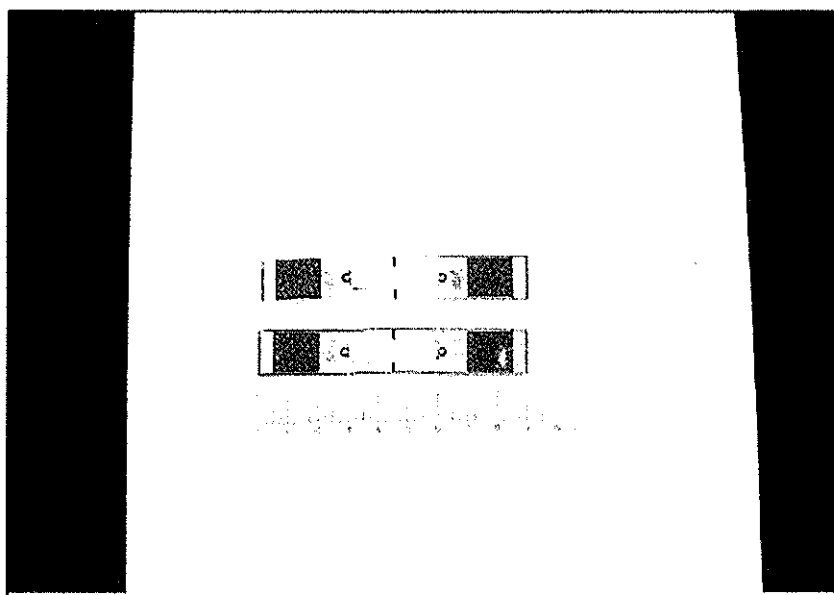


Foto 16

Probetas de caña guadua para prueba de tensión de las fibras

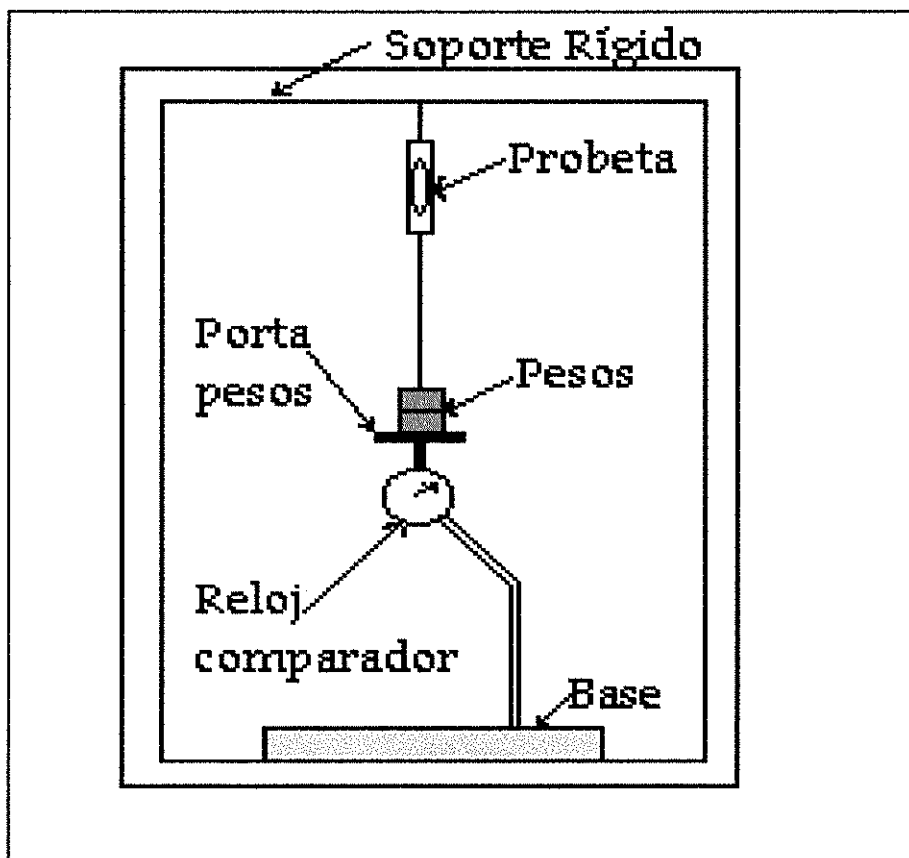


Figura 8

Esquema del equipo utilizado para medir la deformación en la fibra

Una vez que el espécimen está montado en el equipo se procede a cortar el papel de la parte central, dejando la fibra lista para aplicar carga. La carga aplicada y la elongación producida en la fibra son registradas hasta que se produce la rotura del espécimen. El módulo de Young es calculado encontrando la pendiente de la curva carga deformación; la figura 10 muestra una curva típica de este ensayo, junto con las lecturas tomadas para esa curva, (tabla 7).

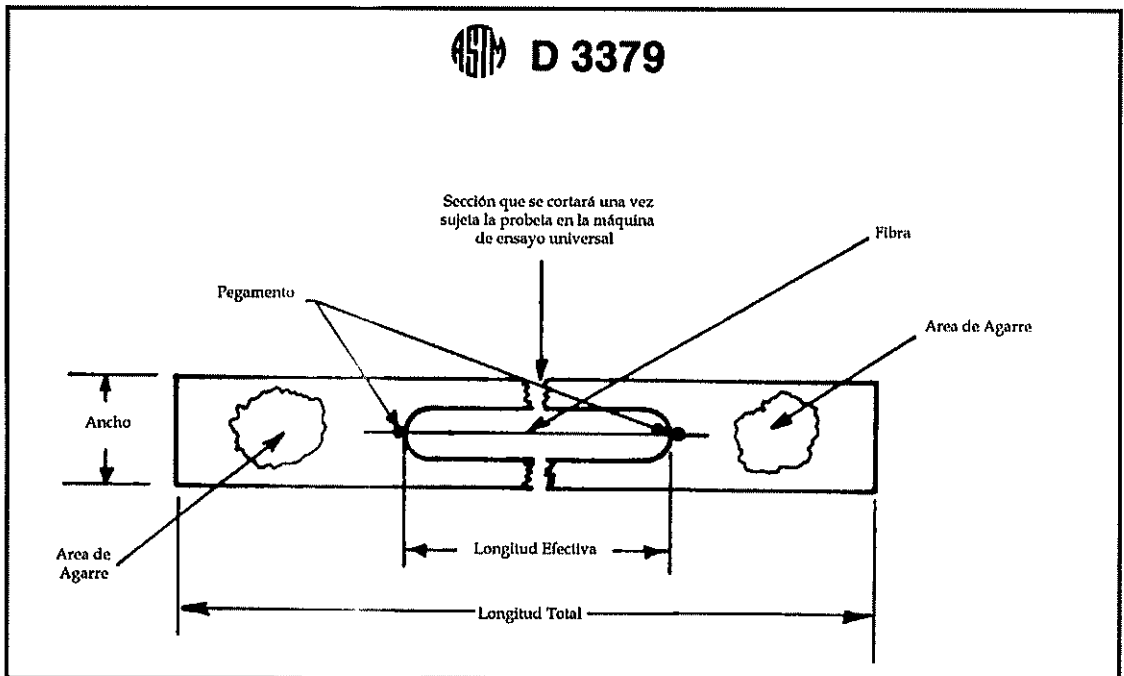


Figura 9
Probeta Típica para prueba de tensión de una fibra

Donde:

| | |
|-------------------|-------|
| Longitud Total | 90 mm |
| Longitud Efectiva | 30 mm |
| Ancho | 15 mm |



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MANIZALES

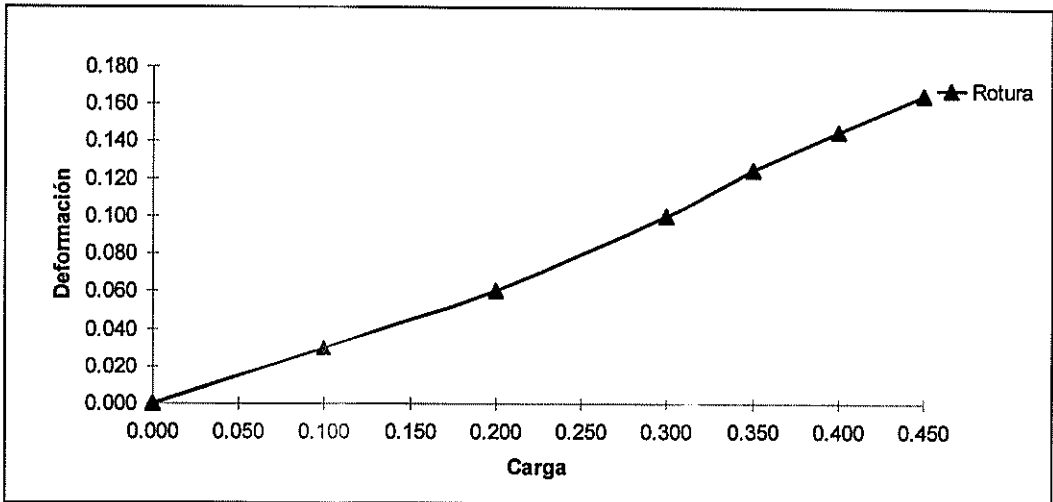


Figura 10
Curva Esfuerzo vs Def. Unitaria fibra de yute probeta 1

Probeta # 1

Longitud 30 mm

Diámetro 5.7E-02 mm

A_{Trans.} 0.160 mm²

| P Kg | d mm |
|---------|---------|
| 0.000 | 0.000 |
| 0.100 | 0.030 |
| 0.200 | 0.060 |
| 0.300 | 0.100 |
| 0.350 | 0.125 |
| 0.400 | 0.145 |
| 0.450* | 0.165* |

* Rotura

Tabla 7

Valores registrados para la fibra de yute probeta 1

2.5. PRUEBA DE TENSÓN

El objeto de esta prueba es determinar el esfuerzo y la carga de tensión del material compuesto. Las probetas tienen las dimensiones de acuerdo con la regla ASTM D3039 - 76 (Reapproved 1989)⁶¹, que se muestran en la figura 11.

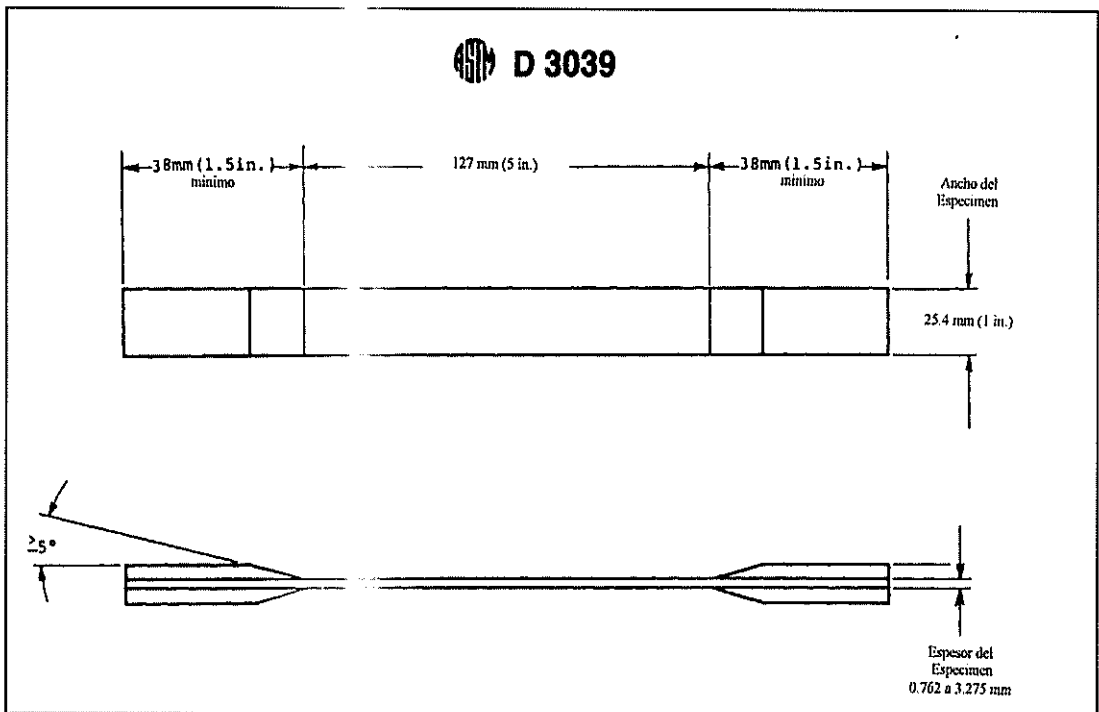


Figura 11
Probeta típica para ensayo de Tensión



BIBLIOTECA
IAC, 1996
MARIQUINA

a) Equipo Requerido

- (1) Máquina de ensayo universal, con las respectivas mordazas (ver foto 17),
- (2) Célula de carga: 100 kg,
- (3) Calibrador Vernier con capacidad de medida sobre los 30 mm.

b) Procedimiento Experimental

- (1) Sujete la probeta por ambos extremos empleando las mordazas (ver foto 18),
- (2) Mida y anote la longitud efectiva de la probeta,
- (3) Ponga el control de la velocidad del papel en 100 mm/min,
- (4) Ponga el control de carga en 5 kg (rango 2 a 500 kg),
- (5) Proceda a encerar el papel,
- (6) Ponga el control de la velocidad de la máquina en 5mm/min, y,
- (7) Accione el mecanismo para que la máquina empiece a tensionar al especimen hasta su rotura,
- (8) Retire la probeta de la máquina, esto se logrará abriendo las mordazas.

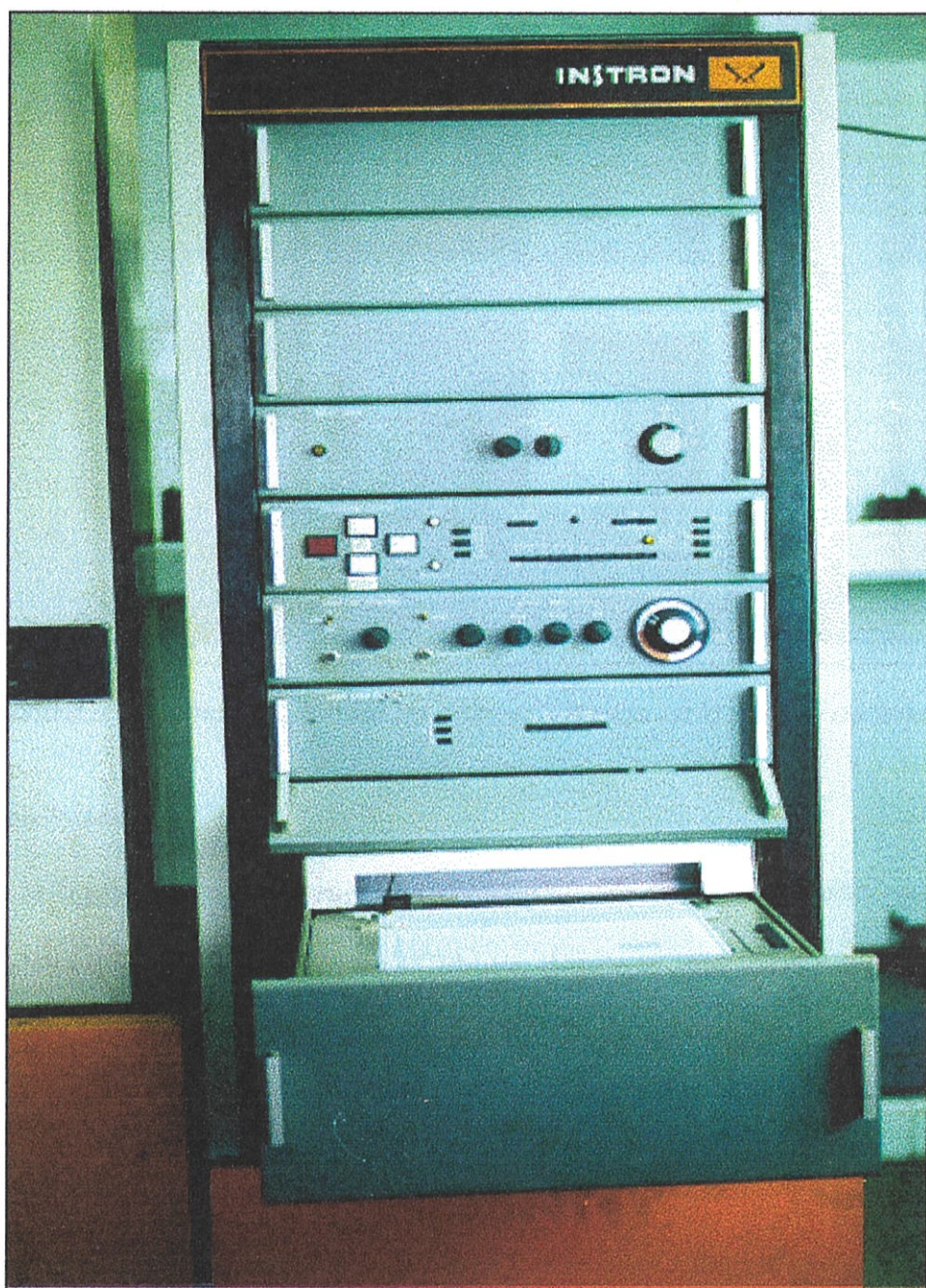


Foto 17
Controles de la máquina de ensayo universal utilizada en los ensayos de tensión y corte (FIM)

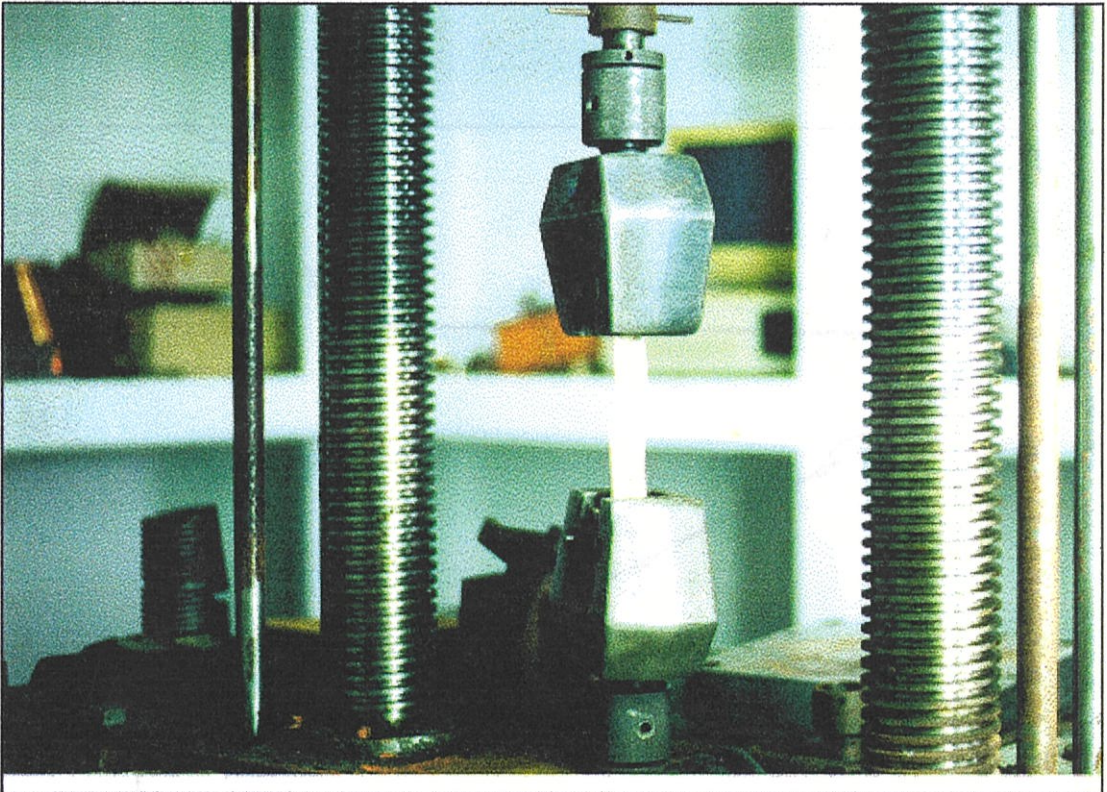


Foto 18

Mordazas sujetando la probeta de cabuya utilizada en la prueba de tensión

c) Resultados

En la figura 12 se muestra una curva típica de carga/extensión para una probeta del compuesto Resina - Cabuya, donde se muestran dos puntos de falla, que serán analizados posteriormente en el capítulo 3.

Se encontró una excesiva variación en la pendiente de las curvas registradas, por lo tuvieron que descartarse estos resultados para deducir el módulo de Young. Para ello se implementó la prueba de flexión, descrita posteriormente.

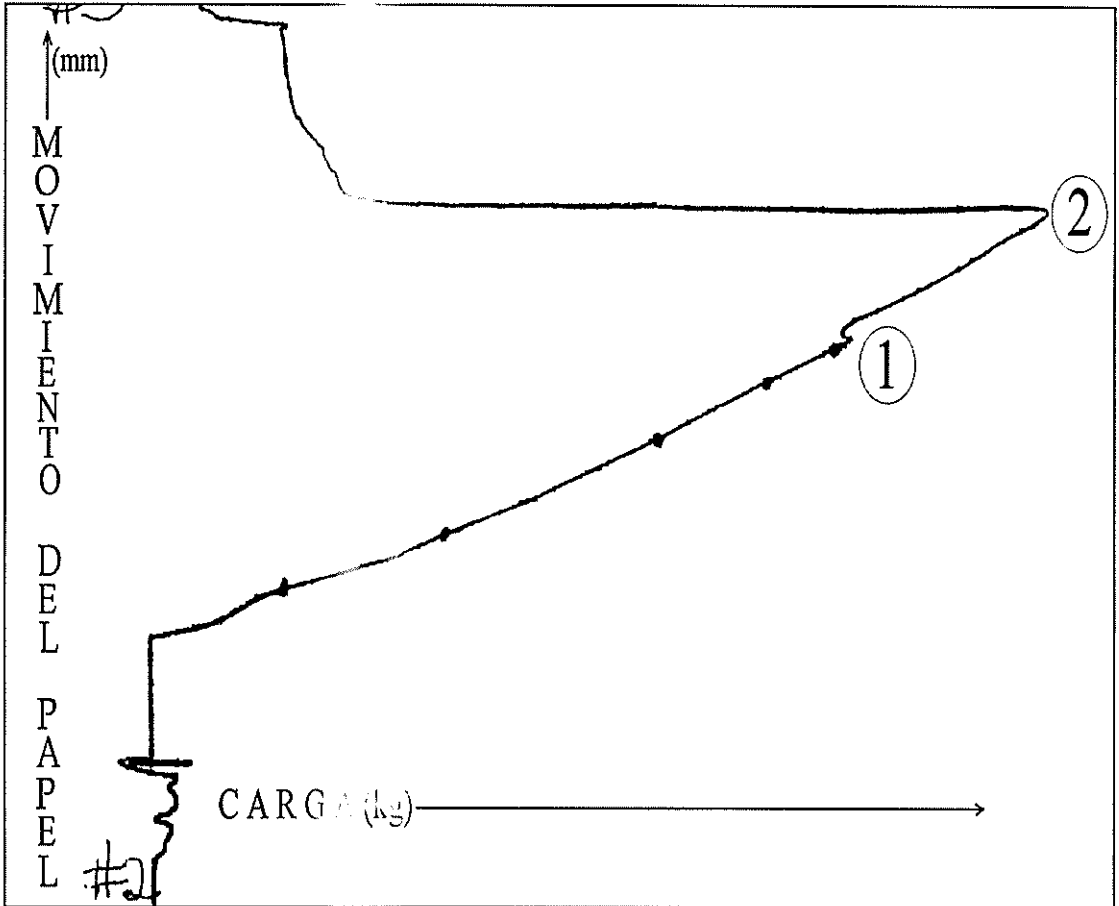


Figura 12
Curva carga - extensión para el compuesto resina - cabuya

Los valores de carga (P) y desplazamiento (d) obtenidos para los puntos 1 y 2 (véase la figura 12), se presentan en las tablas 8 - 9 para la fibra de yute y cabuya respectivamente.

| YUTE | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | | 1 | | 2 | |
| Grados | P (kg) | d (mm) | P (kg) | d (mm) | |
| 0 | 12.5 | 4 | - | - | |
| 15 | 20 | 2.2 | 51.5 | 8 | |
| 30 | 25 | 18 | 35 | 31 | |
| 45 | 29 | 5 | 45 | 10 | |
| 60 | 8 | 5 | 72 | 42 | |
| 75 | 3.5 | 3 | 19 | 32 | |
| 90 | 7 | 7 | 48 | 42 | |

Tabla 8

Carga de rotura de la fibra y matriz registrados para el hilo de yute

| CABUYA | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | | 1 | | 2 | |
| Grados | P (kg) | d (mm) | P (kg) | d (mm) | |
| 0 | 3.5 | 4 | 64 | 86 | |
| 15 | 8.5 | 6 | 16 | 16 | |
| 30 | 5 | 3 | 52.5 | 18 | |
| 45 | - | - | 15 | 12 | |
| 60 | 6 | 2 | 25 | 10 | |
| 75 | 12 | 4 | 67 | 15 | |
| 90 | 16 | 5 | 47 | 26 | |

Tabla 9

Carga de rotura de la fibra y matriz registrados para el hilo de cabuya



BIBLIOTECA
IAS, INC.
MARIJUMA

2.6. PRUEBA DE CORTE

Esta prueba tiene por objeto determinar el módulo de corte G_{xy} del material compuesto. En la figura 13 se muestran las dimensiones de una probeta utilizada para esta prueba según ASTM D 4255 - 83.

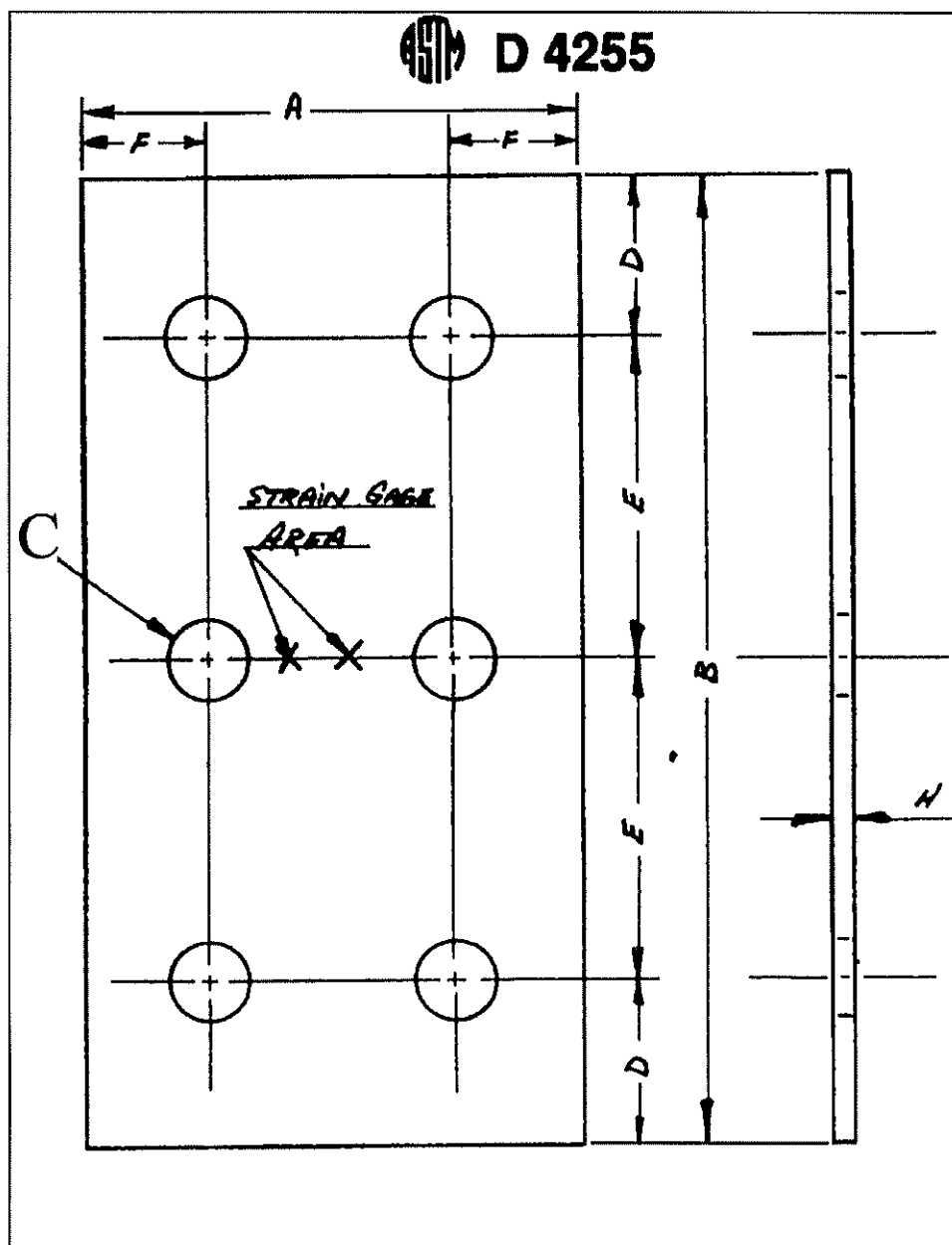


Figura 13
Dimensiones principales de la probeta típica para prueba de corte

De la anterior figura:

| Dimensión | mm | in |
|------------------|--------------|-----------|
| A | 760.0 | 3.0 |
| F | 15.9 | 0.625 |
| C | 12.7 | 0.50 |
| D | 25.0 | 1.0 |
| E | 51.0 | 2.0 |
| B | 152 | 6.0 |
| H | A ser medido | |

a) Equipo Requerido

- (1) Máquina de ensayo universal
- (2) Célula de carga
- (3) Para este ensayo fue necesario construir el así llamado "dispositivo para prueba de corte"; los planos para este dispositivo se muestran en la figura 14 y, en la foto 19 se puede observar el dispositivo ya construido, los que siguen la recomendación dada por la regla ASTM D4255 - 83.

b) Procedimiento Experimental

- (1) Coloque el dispositivo para la prueba de corte en la máquina de ensayo universal (ver foto 20),
- (2) Asegure la probeta en el dispositivo para prueba de corte,
- (3) Ponga el control de la velocidad del papel en 200 mm/min,

- (4) Ponga el control de carga en 10 kg,
- (5) Ponga el control de la velocidad de la máquina en 5 mm/min,
- (6) Retire la probeta del dispositivo para prueba de corte.

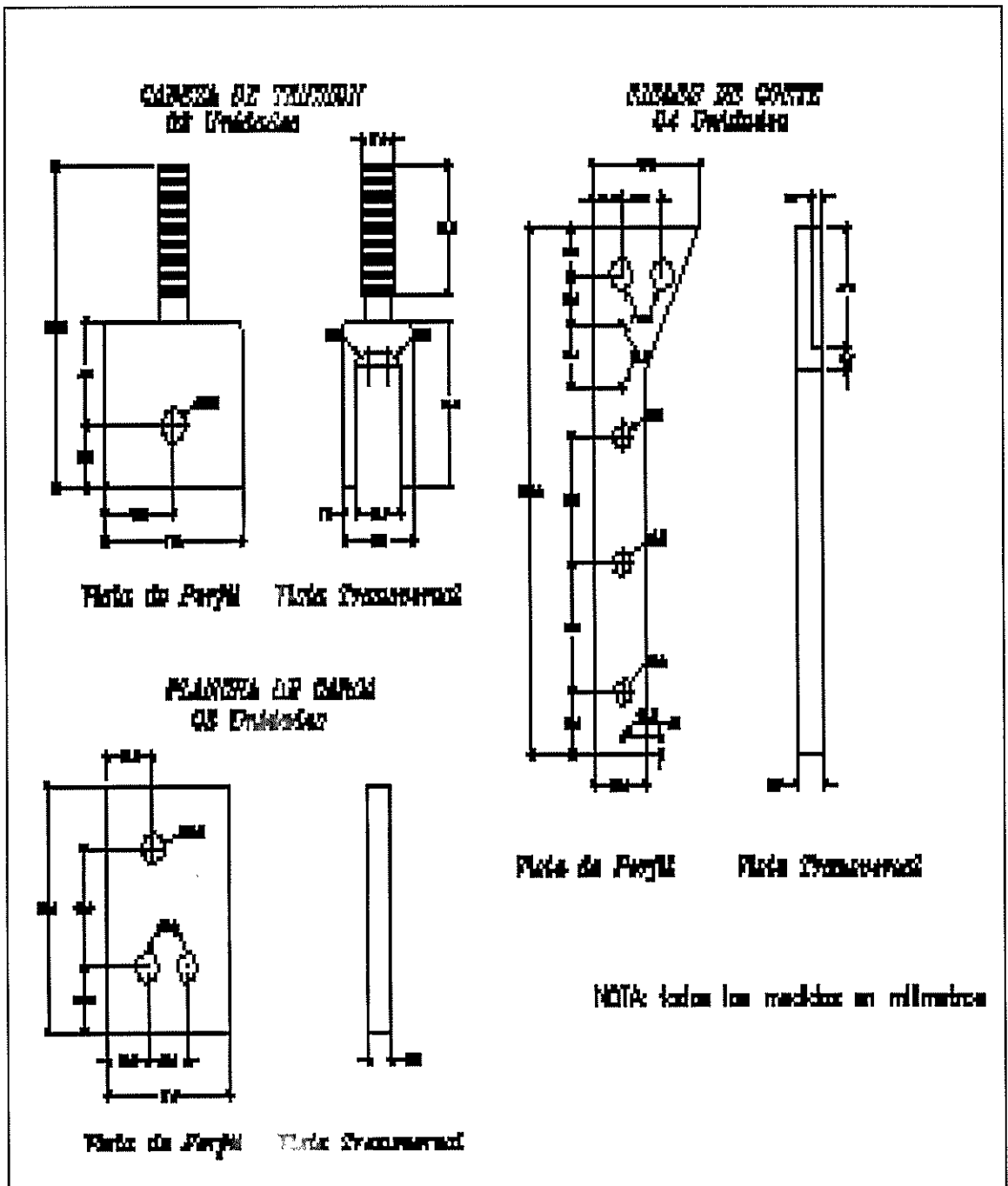


Figura 14
Plano del "Dispositivo para prueba de Corte"

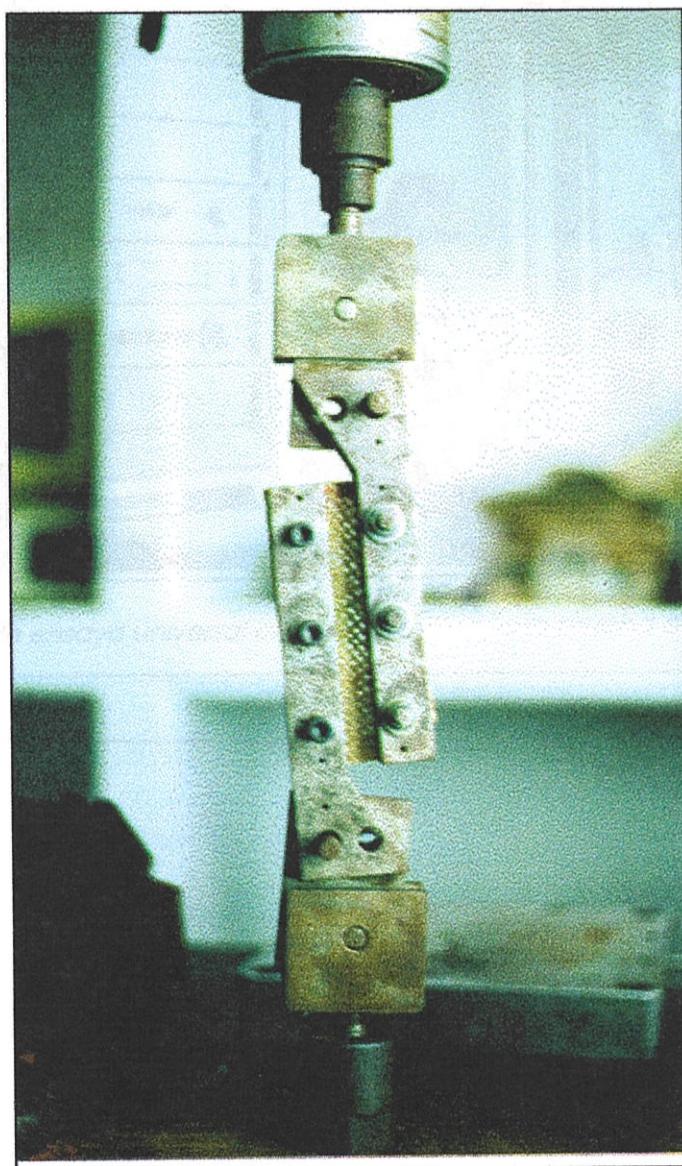


Foto 19
Dispositivo para prueba de Corte



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

En la figura 15 se muestra una curva típica de carga - extensión obtenida en el ensayo de corte para el compuesto resina - yute.

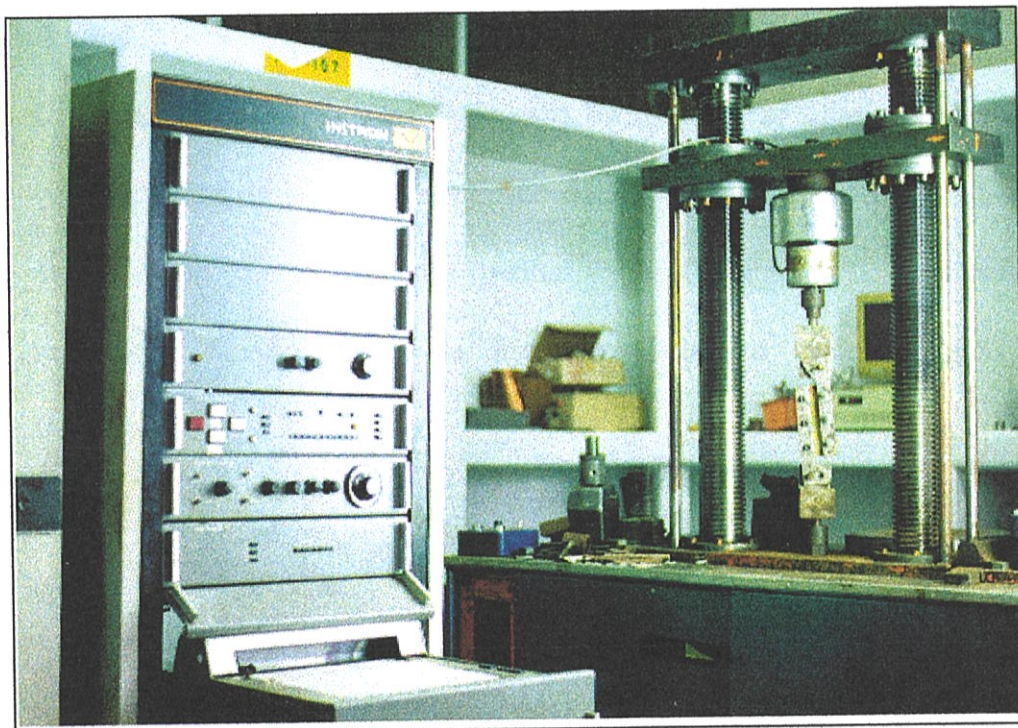


Foto 20

Máquina de ensayo universal con el dispositivo para prueba de corte instalado

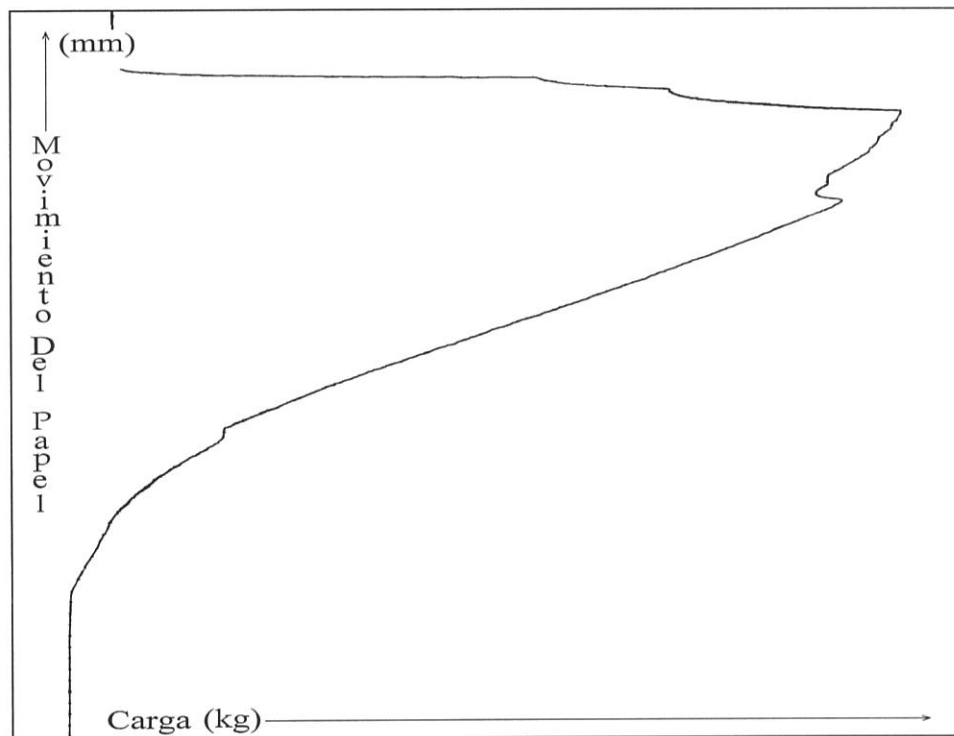


Figura 15

Curva Carga - Extensión compuesto resina - yute

c) Resultados

De igual manera que para la prueba de tensión, se determinan para varios puntos de la curva, el tiempo de la prueba y a través de este, la deformación del compuesto resina - fibra, luego la deformación unitaria y, finalmente de la fórmula dada en la regla ASTM D4255 - 83:

$$G = \frac{(\Delta P / \Delta e)}{2bh},$$



se obtiene el módulo de corte G_{xy} para el compuesto.

BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARIJUANA

Donde:

G: Módulo de corte

$\Delta P / \Delta e$: Pendiente de la curva carga - deformación

b: Largo total, y,

h: Espesor del espécimen

La tabla 10 - 11, muestran el módulo de corte G_{xy} para las diferentes orientaciones del compuesto, resina - cabuya, y resina - yute respectivamente.

| Cabuya | |
|-------------------------------------|------------------|
| θ (grados) | Gxy (psi) |
| 0 | 4.83E+04 |
| 15 | 4.85E+04 |
| 30 | 5.72E+04 |
| 45 | 4.53E+04 |
| 60 | 4.52E+04 |
| 75 | 2.88E+04 |
| 90 | 4.70E+04 |

Tabla 10

Módulo de corte experimental obtenido para el compuesto resina - cabuya

| Yute | |
|-------------------------------------|------------------|
| θ (grados) | Gxy (psi) |
| 0 | 3.48E+04 |
| 15 | 5.41E+04 |
| 30 | 4.46E+04 |
| 45 | 8.15E+04 |
| 60 | 4.13E+04 |
| 75 | 5.15E+04 |
| 90 | 5.44E+04 |

Tabla 11

Módulo de corte experimental obtenido para el compuesto resina - yute

La diferencia respecto de la prueba de tensión está en la forma de agarre del equipo utilizado, tal como se puede apreciar en al foto 2.21, dado que el dispositivo empleado en esta prueba permite la perfecta unión probeta - máquina de ensayo, lo que facilita el desarrollo de la prueba.

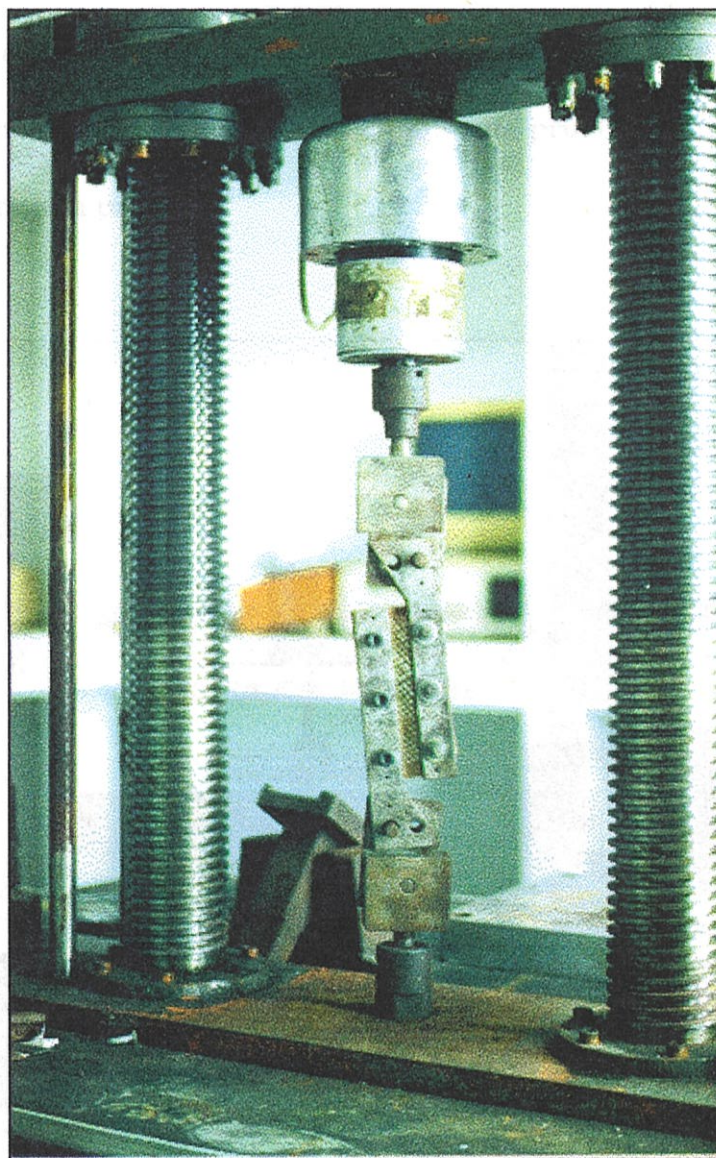


Foto 21

Probeta de Yute utilizada para ensayo de corte, nótese la unión entre la probeta y el equipo para prueba de corte

2.7. PRUEBA DE FLEXIÓN

Debido a los problemas descritos en 2.5 respecto del resbalamiento del espécimen y el bajo nivel de carga desarrollado, hubo de implementarse esta prueba para determinar el módulo de Young y la razón de Poisson, siguiendo el método descrito en la regla ASTM D 790. En la figura 16 se muestra un esquema del equipo utilizado para la prueba de flexión. En la foto 22 se muestra una probeta típica para esta prueba, junto con el equipo utilizado para esta prueba.

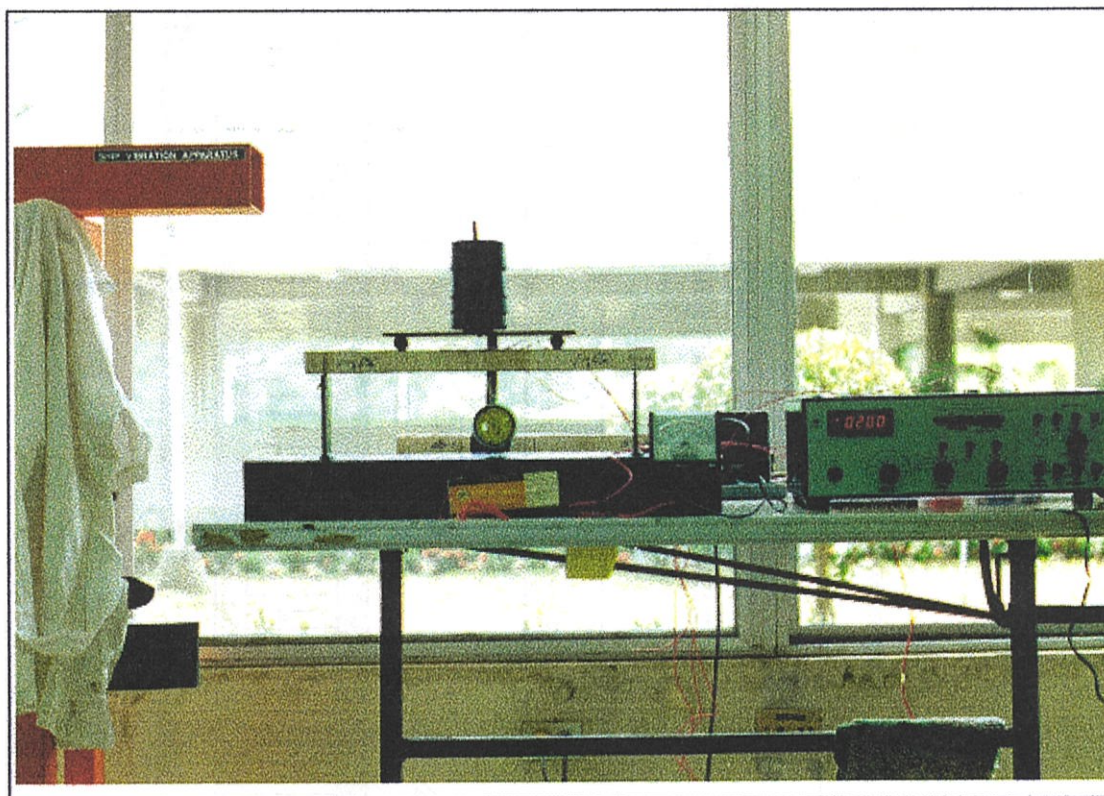


Foto 22
Probeta y equipo utilizado para prueba de flexión



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MEXICO

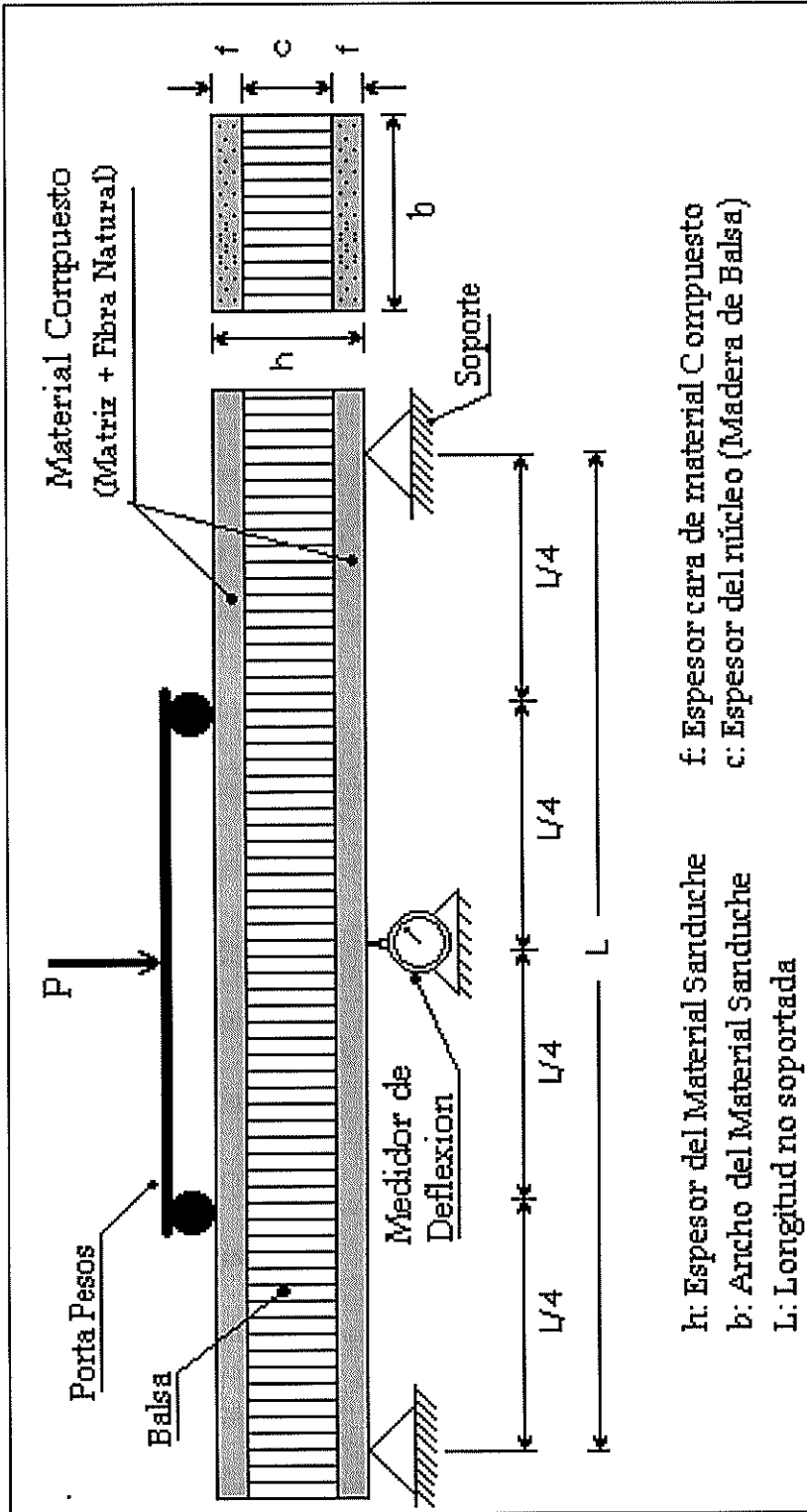


Figura 16

Dispositivo para prueba de flexión, porta pesos, reloj comparador, soportes, material sanduche

| Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | Separación entre soportes (mm) |
|-----------|------------|------------|--------------------------------|
| 25 | 25 | 450 | 400 |

a) Equipo Requerido

- (1) Dispositivo para prueba de flexión,
- (2) Medidor de deformación unitaria Tipo 1526 (marca Brûel & Kjær, con un rango de lectura de 0.1 a 20000 $\mu\epsilon$),
- (3) Un medidor de carátula (reloj comparador) con un rango de 0 - 5 mm con una precisión de 0.01 mm (marca Mitutoyo, modelo 1044F) con una base magnética (marca Mitutoyo, modelo 7010S),
- (4) Porta pesos y pesas y extensómetros.

b) Procedimiento Experimental

- (1) Instalar un extensómetro en la superficie de la probeta (el extensómetro tiene la capacidad de medir la deformación unitaria en dos direcciones perpendiculares entre sí), ver foto 23,
- (2) Conectar y encender: el medidor de deformación y el reloj comparador,
- (3) Aplicar los pesos en forma gradual,
- (4) Registrar los valores de deformación conforme se incrementa el peso, ver foto 24
- (5) Descargar los pesos,
- (6) Registrar el valor de la deformación en descarga,
- (7) Repetir el proceso.

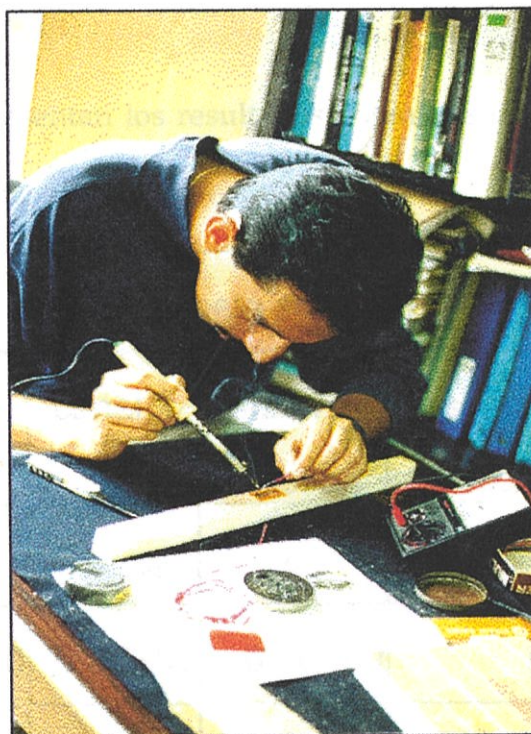


Foto 23

Instalación de extensómetro en una probeta tipo sanduche de fibra de cabuya, utilizada en la prueba de flexión



Foto 24

Registrando valores de la prueba de flexión



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

c) Resultados

En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos para una probeta típica de material sandwich.

| 0 grados-probeta # 1 Yute | | | | | G.F=2.03 |
|---------------------------|----------------------|---------------------|------------------|------------------------------|-----------------|
| | canal 2 | canal 3 | Razón de Poisson | Desplazamiento Vertical (mm) | |
| W (Kg) | $\epsilon_{y=trans}$ | $\epsilon_{x=long}$ | ν | ω | CARGA |
| 0 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | |
| 1 | 4.0E-05 | -1.0E-04 | 4.0E-01 | 1.4E-01 | |
| 2 | 6.0E-05 | -1.7E-04 | 3.5E-01 | 2.8E-01 | |
| 3 | 8.0E-05 | -2.1E-04 | 3.8E-01 | 4.2E-01 | |
| 4 | 1.1E-04 | -2.9E-04 | 3.8E-01 | 5.4E-01 | |
| 0 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 5.5E-02 | DESCARGA |
| 1 | 2.0E-05 | -9.0E-05 | 2.2E-01 | 2.1E-01 | |
| 2 | 6.0E-05 | -1.7E-04 | 3.5E-01 | 3.4E-01 | |
| 3 | 1.0E-04 | -2.2E-04 | 4.5E-01 | 4.6E-01 | |

Tabla 12

Valores típicos registrados para una probeta de Yute sometida a carga de flexión

Los canales dos y tres a los que hace referencia la tabla 12, se trata de los canales de salida del equipo medidor de deformaciones unitarias. El canal dos mide la deformación en sentido transversal y el canal tres la deformación en sentido longitudinal. El G.F. hace referencia al valor del Gage Factor el cual varía dependiendo de las especificaciones del fabricante.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se realizó una descripción de los métodos experimentales que se emplearon para la determinación de las propiedades de los componentes (matriz y fibras) y de los materiales compuestos contruidos con ellos. En el presente capítulo se explica como se manejaron los resultados que produce cada una de las pruebas, hasta cuantificar el objetivo perseguido, (véase Tabla 3), y se establece una interpretación de los resultados finales al compararlos con las relaciones teóricas planteadas. Los resultados parciales de cada una de las pruebas realizadas, y, la comprobación y deducción de las formulaciones empleadas se detallan en los respectivos apéndices, al final de este informe.

En la comparación teoría - experimento las relaciones volumétricas y el módulo de Young de los componentes, fibra natural y matriz, a partir de los ensayos de Tracción y Densidad, se utilizan en la determinación de las propiedades mecánicas teóricas para materiales compuestos. Dichos parámetros de diseño (E_f , ν_f , E_m y ν_m) son comentados y comparados con los de otras fibras sintéticas y resinas disponibles en la bibliografía; además, se



realiza el respectivo análisis y comparación teórico - experimental de cada una de las propiedades mecánicas obtenidas.

BIBLIOTECA
IAC, INC.
MARITIMA

Finalmente, se presenta un Análisis de Resistencia de los materiales compuestos basándose en los criterios desarrollados para un Modelo Micromecánico , que utiliza las deformaciones y esfuerzos de rotura de los componentes (fibra y matriz).

La correlación teoría - experimento realizada para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos fabricados se describe en la figura 17. La parte enmarcada en línea punteada es la correspondiente a las relaciones teóricas planteadas en el capítulo 1, para el análisis de materiales compuestos ortotrópicos. Lo demarcado en los óvalos es lo concerniente a los ensayos descritos en el capítulo 2. Se señala de manera especial las propiedades de los componentes, rombos, las cuales pueden ser únicamente determinadas experimentalmente, los que tienen gran incidencia en la determinación de las propiedades mecánicas experimentales, como se indica en dicha figura.

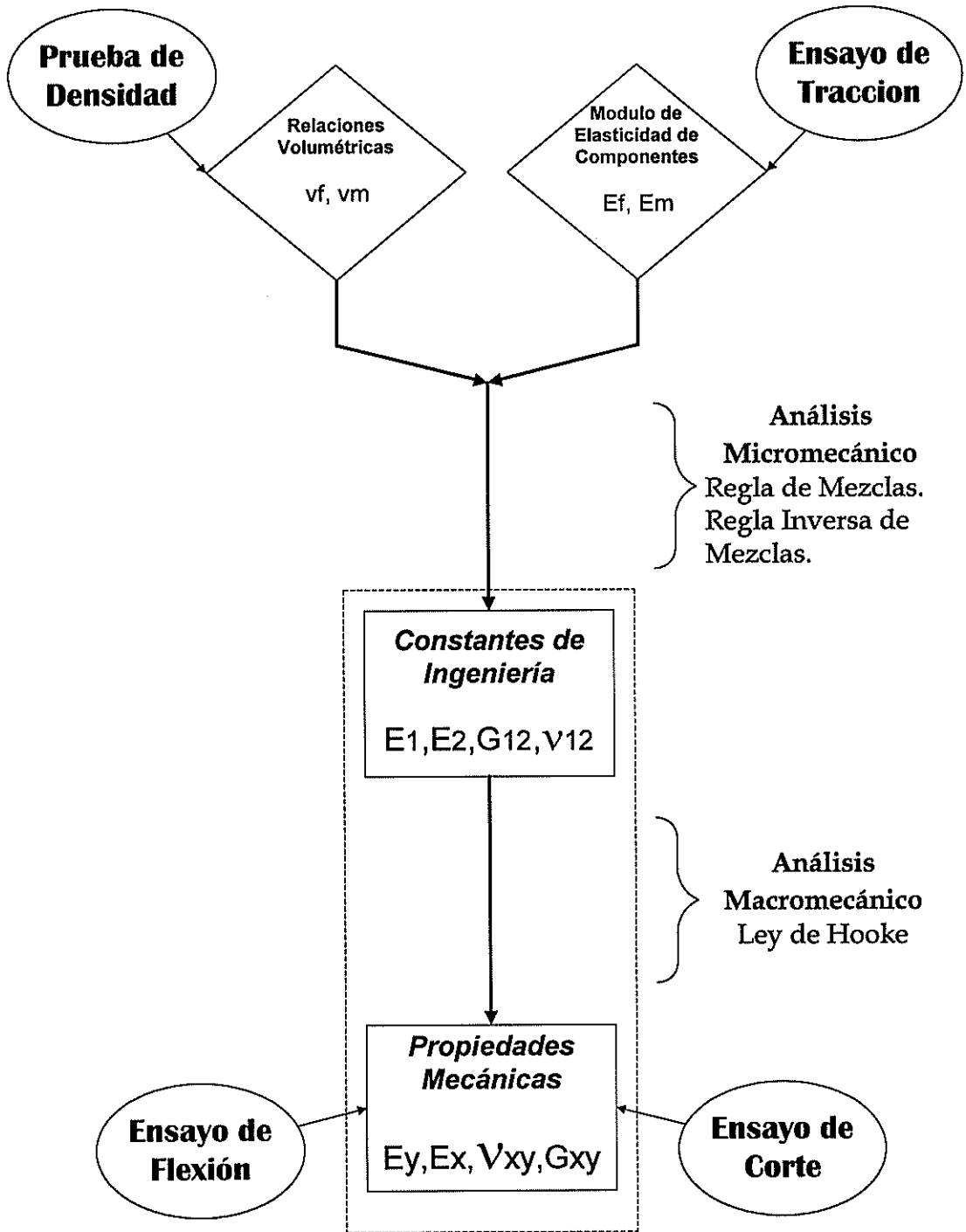


Figura 17
Correlación Teoría - Experimento

3.2. PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES (FIBRA Y MATRIZ)

Los parámetros de diseño utilizados para la construcción de materiales compuestos son el módulo de Young y fracciones volumétricas de los componentes; el conocimiento anticipado de estos parámetros es indispensable para predecir las propiedades mecánicas del futuro material a construirse. La obtención de estas propiedades se las realiza *experimentalmente*, de acuerdo a los métodos descritos en el capítulo anterior. A continuación se detallará el proceso de cálculo a partir de los datos obtenidos en la fase de experimentación.

Módulo de Young de la Fibra y Matriz

La obtención del módulo de Young de la fibra " E_f ", y, matriz, " E_m ", a partir de los datos de carga y desplazamiento (véase tabla 7), se logra por medio de un ensayo de tracción. En el caso del módulo de elasticidad de la fibra, estos valores son transformados en valores de esfuerzo y deformación unitaria, y ploteados en el plano ϵ_f - σ_f . La transformación consiste en dividir los datos de carga [Fuerza] para el área transversal del hilo de la fibra ($\sigma = P/(\pi D^2 / 4)$), y, la elongación (Longitud) para la longitud efectiva de la fibra ($\epsilon_f = \delta/L_0$), resultando valores de esfuerzo y deformación respectivamente. Luego se los relaciona con una línea de tendencia

“cuadrática” ($\sigma_f = a \cdot \epsilon_f^2 + b \cdot \epsilon_f + c$), la cual se la deriva y evalúa en el origen, de manera que la constante “a” corresponde al módulo de Young. La siguiente tabla detalla el cálculo realizado para la fibra de Yute y una curva con los valores resultantes se muestra en la figura 18 , en la que se puede observar que los valores de esfuerzo y deformación guardan entre sí una relación lineal en la zona cercana al origen.

| P Kg | δ mm | L_o mm | A mm ² | $\epsilon = \delta / L_o$ (plg/plg) | $\sigma = A / L_o$ Lbs/plg ² |
|----------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|--|--|
| 0.000 | 0.000 | 30 | 0.160 | 0.0E+00 | 0 |
| 0.100 | 0.030 | 30 | 0.160 | 1.0E-03 | 889 |
| 0.200 | 0.060 | 30 | 0.160 | 2.0E-03 | 1779 |
| 0.300 | 0.100 | 30 | 0.160 | 3.3E-03 | 2668 |
| 0.350 | 0.125 | 30 | 0.160 | 4.2E-03 | 3113 |
| 0.400 | 0.145 | 30 | 0.160 | 4.8E-03 | 3558 |
| 0.450 | 0.165 | 30 | 0.160 | 5.5E-03 | 4002 |

Tabla 13
Transformación de valores Carga - Desplazamiento a Esfuerzo - Deformación
(Fibra de Yute, Probeta No 1)

Se realizaron cinco pruebas de tracción por cada una de las tres fibras usadas como refuerzo, obteniéndose los valores promedio de módulo de Young y diámetro que se resumen en la tabla 14. Cabe resaltar que el valor promedio del módulo de Young que se reporta para la fibra de Yute se lo obtuvo con un haz de fibras, con un promedio de 66 hebras. Por otra parte, para tener uniformidad en el reporte, el valor del diámetro para la caña guadua es el

correspondiente a un diámetro equivalente, es decir el diámetro que hace que una área circular sea igual al área rectangular promedio de la fibra. Además, se reportan los valores de esfuerzo de rotura (σ_r) obtenidos del cociente entre la carga última y el área transversal de la fibra.

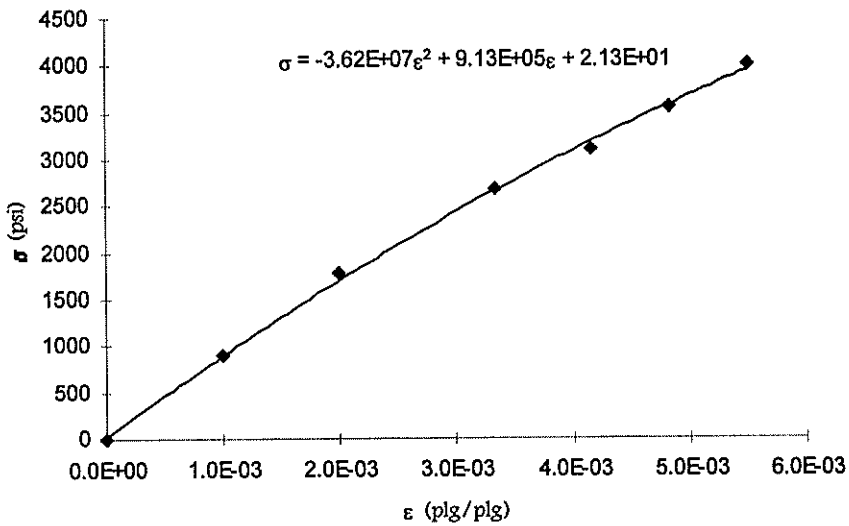


Figura 18
Curva Esfuerzo - Deformación Unitaria (Fibra de Yute, Probeta No1)

| | ϕ (mm) | E_x (10^6 psi) | σ_r (ksi) |
|-------------|----------------|------------------------|---------------------|
| Caña guadua | 0.31 | 1.24 | 33.95 |
| Yute | 0.056 | 0.72 | 10.43 |
| Cabuya | 0.181 | 2.30 | 29.95 |

Tabla 14
Propiedades de Fibras Naturales



BIBLIOTECA
NACIONAL
MEXICANA

Los valores de Módulo de Young para fibras de vidrio del tipo S-G y E-G, reportados en [4], (tabla 3.1, pág. 80) , son 12.4×10^6 y 10.6×10^6 psi respectivamente. Lo anterior indica que son en promedio diez veces mayores que el módulo de las fibras naturales analizadas. Por otra parte, los valores de esfuerzo de rotura en tensión para las fibras tipo S-G y E-G son 600 y 400 ksi respectivamente, los que en promedio son 60 veces mayor que los valores reportados para las fibras naturales en la tabla anterior.

El módulo de Young de la matriz se lo obtuvo de la misma forma que el de las fibras excepto por el equipo utilizado, obteniéndose un valor promedio de 0.31×10^6 psi. De acuerdo con este valor se trataría de una matriz de bajo módulo ("Low Modulus") como la que se reporta en [GIBSON], la que tiene un módulo de Young de 0.32×10^6 psi.

Fracciones Volumétricas

La razón entre el volumen de cada uno de los componentes (fibra y matriz) y el volumen total de compuesto se denomina fracción volumétrica, y refleja la cantidad porcentual en volumen de fibra y matriz que se utiliza en la fabricación del material compuesto. La forma experimental y cálculo para la determinación de estas fracciones es expuesta en el capítulo anterior. El resumen de los valores experimentales promedio encontrados se expone en la

siguiente tabla, donde se reportan valores para la direcciones principales 1 y 2. Las fibras Yute y Cabuya se compraron en forma de tela con trenzado en ambas direcciones, mientras que la Caña Guadua solo tiene fibras en una dirección. Nótese que los valores para la dirección 1 y 2 para el material yute + matriz son iguales, debido a que se asumió el mismo espesor de hilos en la malla de tela de yute; diferente a lo que se presenta en la fibra de cabuya, como se puede observar en la foto 9.

| Material Compuesto | V_m | | V_f | |
|-------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| | <i>Dirección 1</i> | <i>Dirección 2</i> | <i>Dirección 1</i> | <i>Dirección 2</i> |
| Cabuya + Matriz | 0.912 | 0.966 | 0.088 | 0.034 |
| Yute + Matriz | 0.539 | 0.539 | 0.461 | 0.461 |
| Caña + Matriz | 0.561 | - | - | 0.150 |

Tabla 15
Fracciones Volumétricas de los Componentes

3.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUUESTO

Las propiedades mecánicas, Módulo de Young (E_x) y Razón de Poisson (ν_{xy}) experimentales para diferentes orientaciones del componente que sirve como refuerzo (fibra), se determinaron a partir del ensayo de flexión practicado a una viga de material sanduche. Este ensayo nos permite obtener datos de deflexión en el centro del claro (w), y, deformación unitaria en sentido axial (ϵ_x) y transversal (ϵ_y), para una condición de carga y descarga.

Módulo de Young en sentido axial

Los valores de carga vertical aplicada y deformación unitaria axial guardan una relación lineal, de la que se obtiene un valor de pendiente (**m**). Las propiedades geométricas de la viga (**L**, **b**, **h** y **c**) son introducidas en la ecuación (3.1) conjuntamente con el valor de pendiente obteniéndose el módulo de Young en cada una de las probetas ensayadas para las diferentes orientaciones de las fibras (θ):

$$E_{\theta} = \frac{m \cdot h \cdot L}{I_f \cdot 16}, \quad (3.1)$$

donde

E_θ: Módulo de Young del material compuesto,

m: Pendiente de la curva carga - deformación,

L: Longitud no soportada,

h: Espesor de la viga, y,

I_f: Inercia transversal de las caras de material compuesto.

La expresión para el cálculo de la inercia se presenta en la ecuación (3.2); en esta no participa el efecto producido por el núcleo ("core") debido a que la rigidez flexural de la balsa se asume como despreciable.

$$I_f = \frac{b \cdot (h^3 - c^3)}{12}, \quad (3.2)$$



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARILLAS

donde,

b: Ancho de la viga, y,

c: Espesor del núcleo.

Durante las pruebas también se registraron los desplazamientos verticales en el centro de la viga, a partir de dichos resultados se obtuvo un segundo módulo de Young, a partir de la pendiente (**m**) en la zona lineal de la curva carga - deflexión, para diferentes orientaciones de la fibra. Para ello se empleó la ecuación (3.3) sugerida en la prueba D 790M-86 de la referencia [1].

$$E_{\theta} = -0.172 \frac{m \cdot L^3}{b \cdot (h^3 - c^3)}, \quad (3.3)$$

donde los valores de **b**, **c**, **h**, y **L** corresponden a los definidos en la ecuación (3.1).

A continuación se ilustra el cálculo realizado para la determinación del módulo de Young para una orientación de la fibra de noventa grados (90°), del material compuesto Resina + Cabuya. La tabla 16 detalla las lecturas del reloj comparador, correspondientes a la deflexión en tres probetas (P-1, P-2, P-3) para la carga y descarga de pesos en el rango de 0 a 4 kg. Además se incluye la deformación unitaria, en dirección transversal y axial, registradas en los canales 2 y 3 del equipo medidor de deformaciones, correspondientes a

la probeta No 1. El valor negativo de la deformación axial indica una contracción de la viga de material sandwich consistente con el esfuerzo compresivo que soporta esta zona de la viga. En la figura 19 se ilustra la relación lineal existente entre los valores de carga y deformación unitaria axial; la pendiente de esta curva es utilizada en la evaluación de la ecuación (3.1). De igual forma las pendientes de las curvas carga vs deflexión para las tres probetas, son empleadas en la estimación del módulo de Young usando la ecuación (3.3).

| W (Kg) | Deflexión w (mm) | | | Deformación Unitaria Probeta No 1 | |
|-----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|
| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 2 | ϵ_y (mm/mm) | ϵ_x (mm/mm) |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.0E+00 | 0.00E+00 |
| 1 | 0.257 | 0.245 | 0.165 | 3.4E-05 | -1.62E-04 |
| 2 | 0.503 | 0.580 | 0.540 | 5.0E-05 | -2.58E-04 |
| 3 | 0.745 | 0.895 | 0.790 | 7.0E-05 | -3.58E-04 |
| 4 | 1.010 | 1.240 | 1.050 | 9.9E-05 | -4.60E-04 |
| 0 | 0.160 | 0.130 | 0.150 | -1.0E-05 | -1.22E-04 |
| 1 | 0.400 | 0.470 | 0.535 | 2.0E-05 | -2.22E-04 |
| 2 | 0.620 | 0.800 | 0.850 | 4.8E-05 | -3.14E-04 |
| 3 | 0.825 | 1.070 | 1.025 | 7.5E-05 | -3.98E-04 |

Tabla 16
Datos Carga - Deflexión y Carga - Deformación (Probeta No 1, Resina + Cabuya)

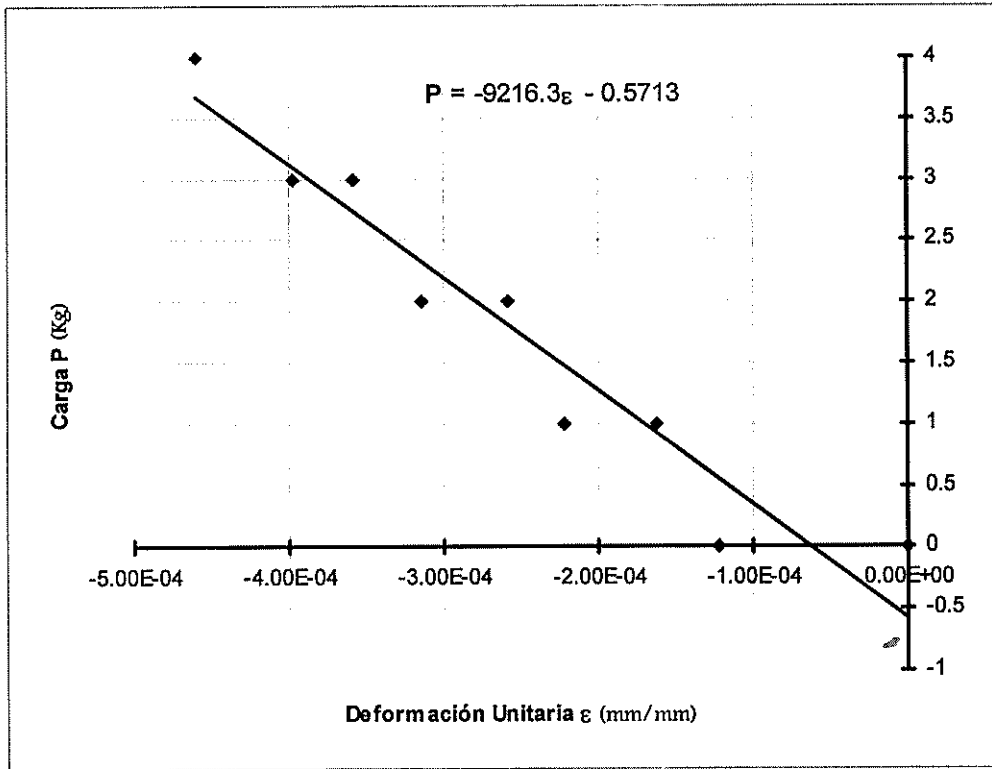


Figura 19
Curva Carga - Deformación Unitaria axial (Probeta No 1, Resina + Cabuya)

La evaluación de las ecuaciones (3.1) y (3.3) se resumen en la tabla 17, donde el valor de la pendiente para la probeta No 1 marcado con un asterisco está expresado en $[\text{lb}/(\text{plg}/\text{plg})]$, y corresponde al expresado en la figura anterior en unidades de $[\text{kg}/(\text{mm}/\text{mm})]$. Los valores restantes, son las pendientes de las curva carga - deflexión expresados en $[\text{lb}/\text{plg}]$.

| Constantes | Probeta | | Probeta | |
|---|----------|---------|---------|---------|
| | No 1 | | No 2 | |
| Pendiente de la curva carga - deflexión, m (lb/plg) | *20321.9 | 231.61 | 176.78 | 184.15 |
| Longitud no soportada, L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Ancho viga, b (plg) | 0.98 | 0.98 | 0.94 | 0.98 |
| Espesor viga, h (plg) | 1.06 | 1.06 | 1.07 | 1.07 |
| Espesor total de las caras, f (plg) | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.11 |
| Espesor Núcleo, c (plg) | 0.80 | 0.80 | 0.83 | 0.84 |
| Módulo de Elasticidad, E (psi) | 3.70e+5 | 2.24e+5 | 1.92e+5 | 1.97e+5 |



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

Tabla 17
Módulo de Young Material Resina + Cabuya. Probeta No 1 $\theta = 90^\circ$

El resumen de todos los cálculos realizados en los tres materiales compuestos se muestran en el Apéndice 3. La sinopsis del módulo de Young experimental, empleando la ecuación (3.1), y el correspondiente valor teórico para diferentes orientaciones de la fibra usando la ecuación (1.11), en los tres materiales compuestos fabricados, se ilustra en la tabla 18. Los datos de E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} para cada material se reportan en la parte superior de la tabla. Además, en las figuras 20, 21 y 22 se presentan la comparación gráfica de los datos experimentales y teóricos.

| Orientación de la Fibra | Módulo de Elasticidad Resina + Cabuya | | Módulo de Elasticidad Resina + Yute | | Módulo de Elasticidad Resina + Caña | |
|-------------------------|---------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
| | Experimental | Teórico | Experimental | Teórico | Experimental | Teórico |
| 0 | 5.7E+05 | 8.8E+05 | 7.9E+05 | 9.7E+05 | 6.33E+05 | 7.42E+05 |
| 15 | 6.1E+05 | 6.63E+05 | 6.3E+05 | 7.03E+05 | 3.81E+05 | 5.93E+05 |
| 30 | 5.1E+05 | 4.42E+05 | 6.1E+05 | 4.53E+05 | 5.44E+05 | 4.18E+05 |
| 45 | 3.4E+05 | 3.76E+05 | 7.0E+05 | 3.85E+05 | 3.16E+05 | 3.53E+05 |
| 60 | 3.6E+05 | 4.30E+05 | 4.8E+05 | 4.53E+05 | 3.09E+05 | 3.73E+05 |
| 75 | 3.0E+05 | 6.19E+05 | 5.9E+05 | 7.03E+05 | 3.69E+05 | 4.56E+05 |
| 90 | 3.7E+05 | 7.95E+05 | 6.1E+05 | 9.70E+05 | 2.35E+05 | 5.18E+05 |

Tabla 18
Comparación del Módulo de Elasticidad Teórico y Experimental para Materiales Compuesto empleando fibras naturales como refuerzo.

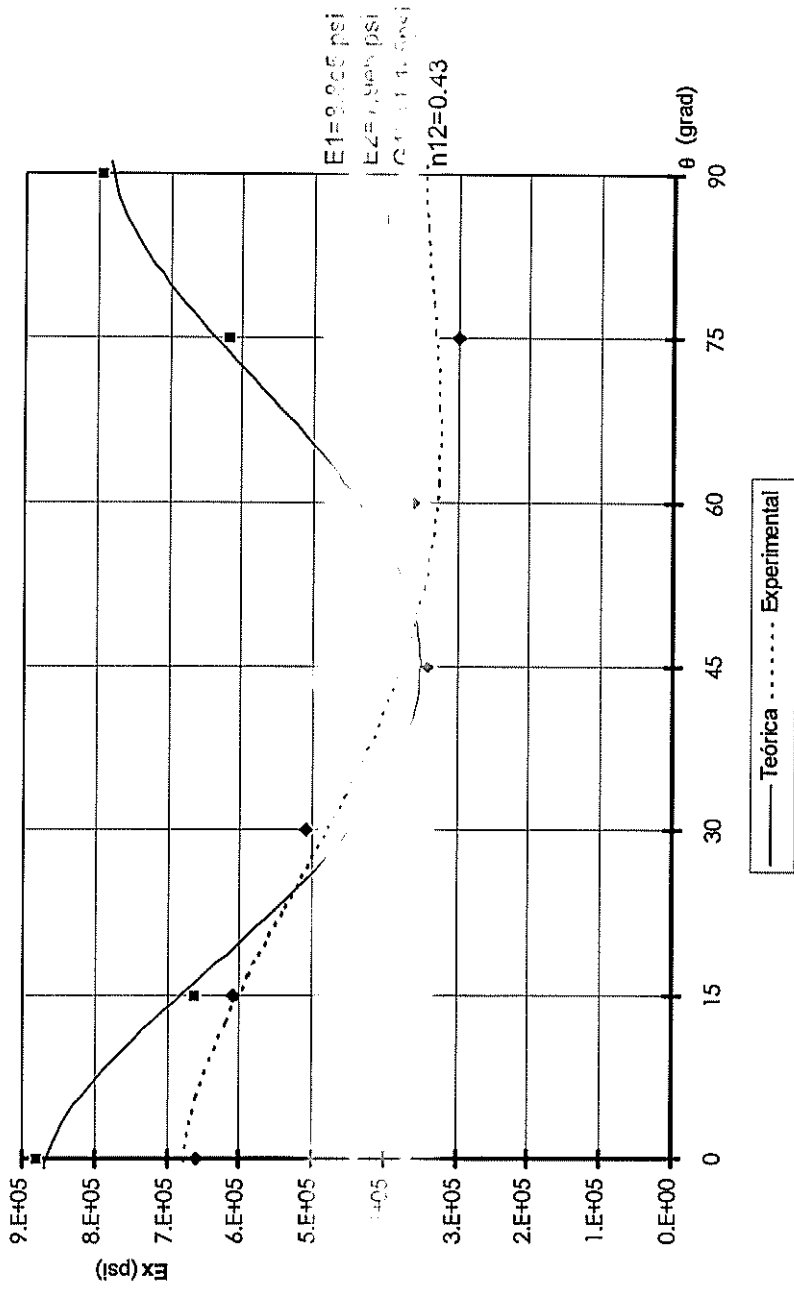


Figura 20
 Comparación Gráfica Teórica - Experimental del Módulo de Young para Material Resina - Cabuya



BIBLIOTECA
INC. INC.
MARIKINA

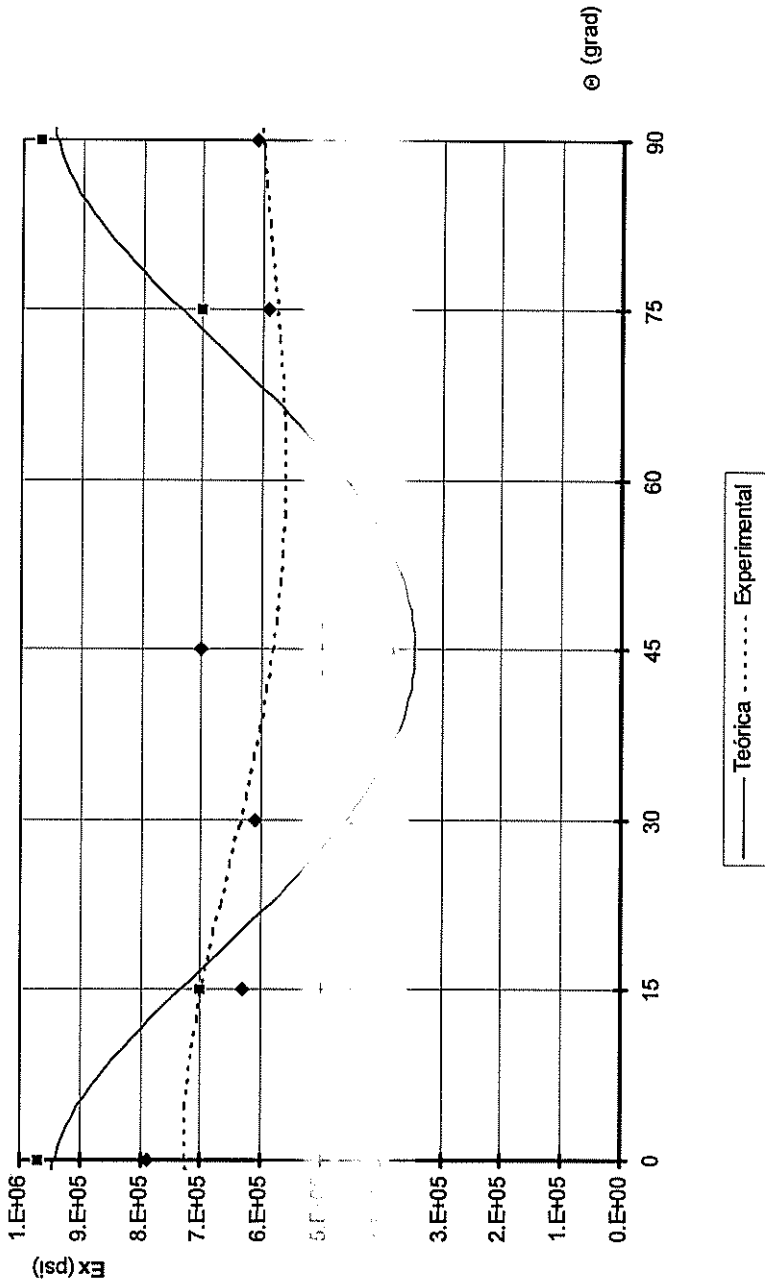


Figura 21
Comparación Gráfica Teórica - Experimental del Módulo de Young para Material Resina - Yute

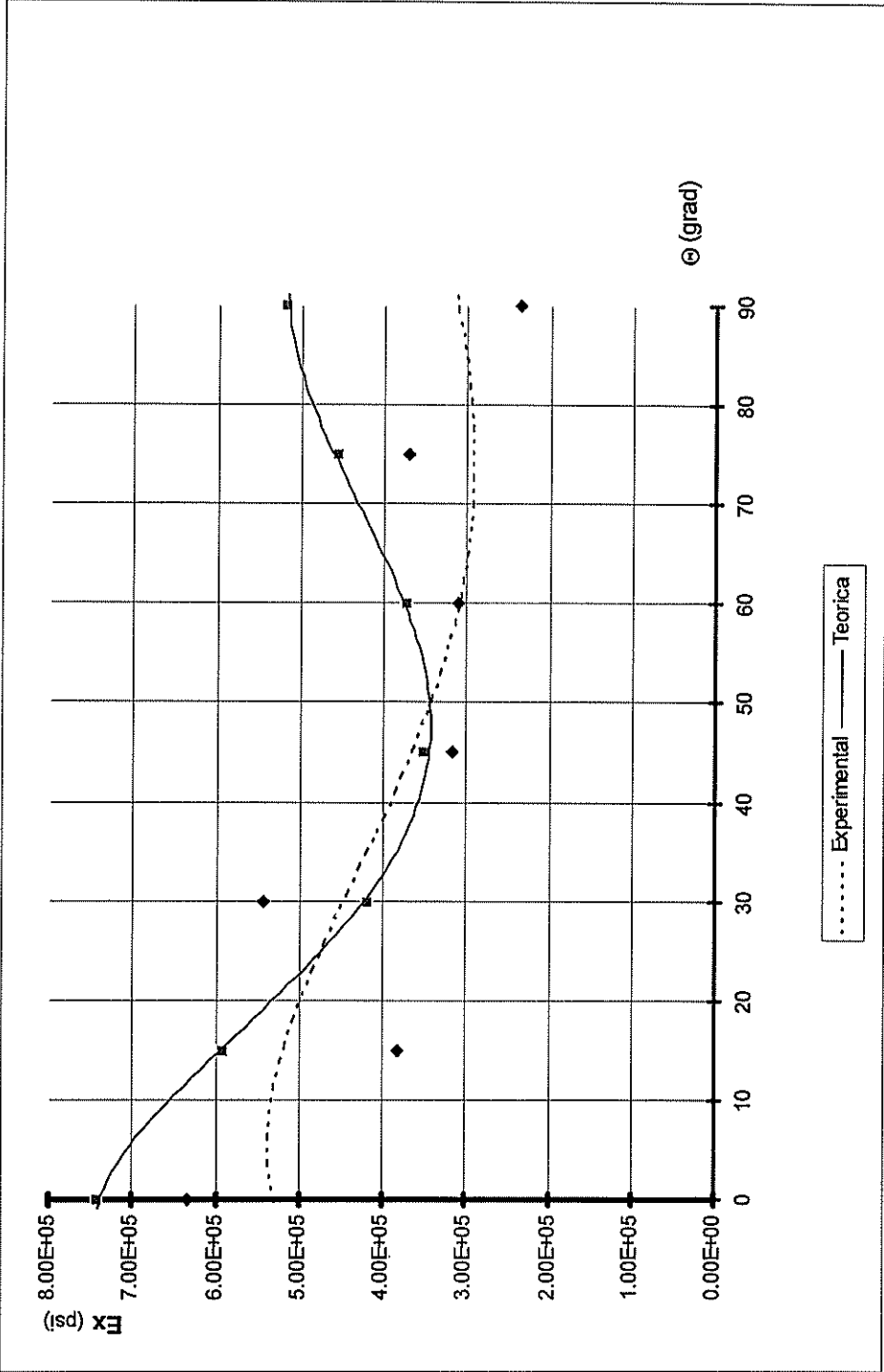


Figura 22
Comparación Gráfica Teórica - Experimental del Módulo de Young para Material Resina - Caña

La curva experimental en los gráficos anteriores es producida por una "línea de tendencia" en base a los valores experimentales, la cual muestra la variación en forma descendente del módulo de elasticidad a medida que aumenta el ángulo de orientación (θ) de las fibras y luego tiende a recuperarse para volver al valor E_2 , que incluye las fibras en sentido transversal. La variación de la curva experimental es muy acentuada para el material *Cabuya + Resina*, debido a la desigualdad en el espesor de los hilos en direcciones mutuamente ortogonales que existe en la tela de Cabuya, figura 20. Para el material *Yute + Resina*, se observa una variación menos marcada, como consecuencia de la similitud en espesor de los hilos en la tela de Yute, figura 21. Las curvas teóricas ilustran una tendencia descendente en módulo de elasticidad hasta un valor más bajo para 45 grados y luego se invierte; nótese que para el compuesto *Yute + Resina* los valores a 0 y 90 grados son iguales, como resultado de emplear iguales valores para el Módulo de Young en las direcciones principales 1 y 2 .

Los valores experimentales, en general, se encuentran en el mismo orden de magnitud que los teóricos. Si comparamos los valores experimentales obtenidos para los tres materiales obtenidos, notamos que el material *Yute + Resina* presenta los mayores módulos de elasticidad en comparación con los del material *Cabuya + Resina*.

BIBLIOTECA
FAC. ING.
MEXICO

Relación de Poisson

En el caso de la viga de material sanduche sometido a flexión, la cara sobre la cual se aplica la carga vertical está sometida a un esfuerzo compresivo esto es contracción en sentido axial, lo cual implica una expansión lateral. En la ecuación 4.11 de la referencia [6] se incluye una descripción matemática de este fenómeno. Por ejemplo, si solo $\sigma_x \neq 0$, entonces $\epsilon_x = \sigma_x / E$ y $\epsilon_y = -\nu_{12} \sigma_x / E$. El signo negativo es para tener en cuenta la contracción del material en las direcciones "y" a medida que se alarga en la dirección "x". La razón del valor (con su signo) de la deformación lineal en la dirección lateral a la deformación lineal en dirección axial, es por definición la relación de Poisson, es decir,

$$\nu_{xy} = - \frac{\text{deformacion lateral}}{\text{deformacion axial}} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}. \quad (3.4)$$

La medición de los valores experimentales de deformación transversal y axial se lograron a partir del uso de dos extensómetros sobre una cara de la viga sanduche de material compuesto + balsa construida. Estos valores fueron registrados en los canales 2 y 3, respectivamente, del Equipo Medidor de Deformaciones. En la tabla 16 se ilustra un ejemplo de los valores registrados, y en la siguiente tabla la evaluación de la fórmula (3.4), donde la ultima columna es el valor promedio de la relación de Poisson que se reporta finalmente.

| W (kg) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | Prom. |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ν (mm/mm) | 0.000 | 0.210 | 0.194 | 0.196 | 0.215 | 0.000 | 0.090 | 0.153 | 0.188 | 0.138 |

Tabla 19
Datos Carga - Relación de Poisson
(Material Sanduche Cabuya, Probeta No 1, 90 grados)

Los valores teóricos fueron calculados a partir del empleo de la ecuación (1.14) para diferentes orientaciones de los ejes principales, empleando los mismas constantes de ingeniería (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12}), para cada una de los materiales compuestos, y se indican en la tabla 18. La sinopsis de los valores teóricos y experimentales, para la Razón de Poisson, encontrados en este trabajo de investigación para los tres materiales compuestos construidos, se presentan en la tabla 20.

Los valores experimentales y teóricos son ploteados para cada uno de los materiales compuestos, como se ilustra en cada una de las siguientes figuras. En el eje de las abcisas se presenta la orientación de las fibras respecto de los ejes principales, o en su defecto del material de refuerzo, y en el de las ordenadas los valores de Razón de Poisson.

| Orientación de la Fibra θ (Grados) | Razón de Poisson Resina + Cabuya | | Razón de Poisson Resina + Yute | | Razón de Poisson Resina + Caña | |
|--|----------------------------------|---------|--------------------------------|---------|--------------------------------|---------|
| | Experimental | Teórico | Experimental | Teórico | Experimental | Teórico |
| 0 | 0.200 | 0.430 | 0.283 | 0.430 | 0.521 | 0.430 |
| 15 | 0.010 | 0.566 | 0.176 | 0.587 | 0.501 | 0.521 |
| 30 | 0.212 | 0.701 | 0.232 | 0.734 | 0.385 | 0.618 |
| 45 | 0.246 | 0.734 | 0.311 | 0.774 | 0.275 | 0.626 |
| 60 | 0.255 | 0.682 | 0.168 | 0.734 | 0.261 | 0.551 |
| 75 | 0.081 | 0.528 | 0.189 | 0.587 | 0.233 | 0.401 |
| 90 | 0.138 | 0.388 | 0.136 | 0.430 | 0.228 | 0.300 |

Tabla 20
Comparación de Razón de Poisson experimental y Teórica para Materiales Compuesto empleando fibras naturales como refuerzo.



BIBLIOTECA
IAC, ING.
MARITIMA

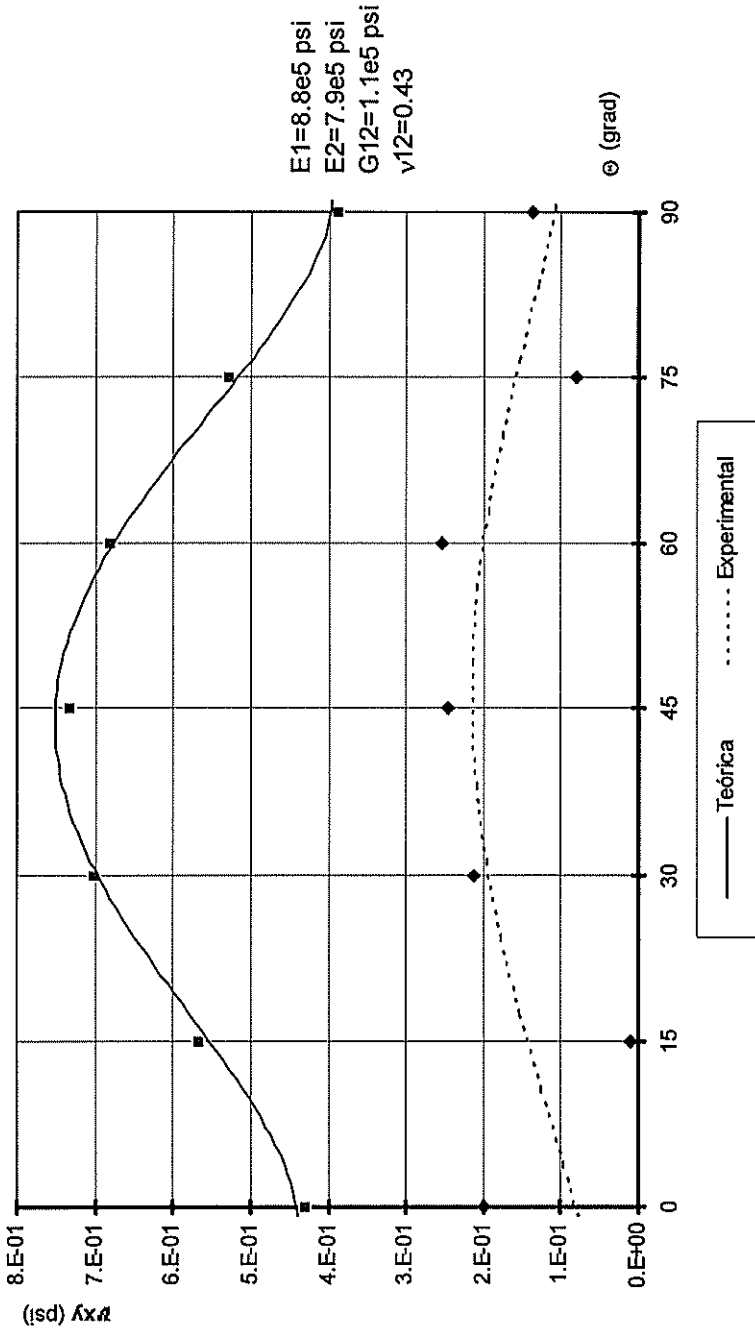


Figura 23
Comparación Gráfica Teórica - Experimental de la Razón de Poisson para Material Resina - Cabuya

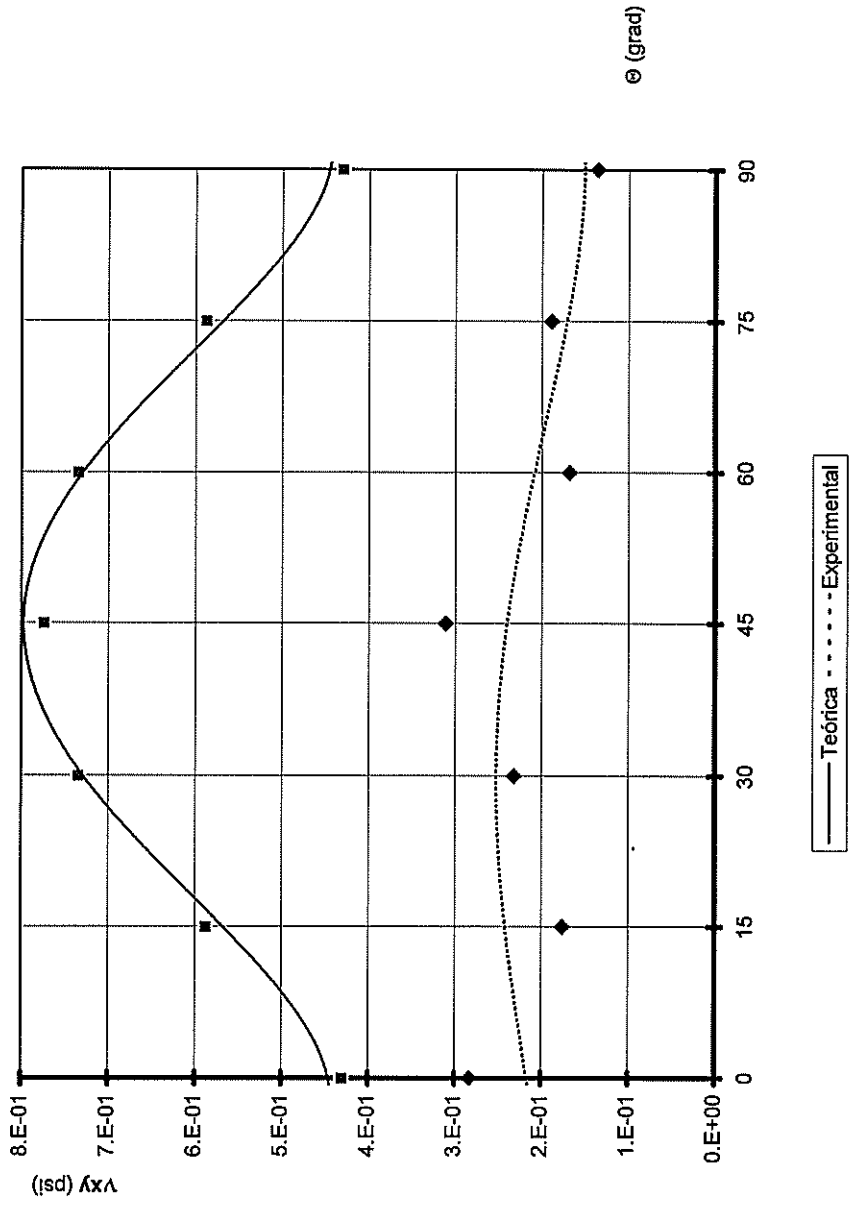


Figura 24
Comparación Gráfica Teórica - Experimental de la Razón de Poisson para Material Resina - Yute

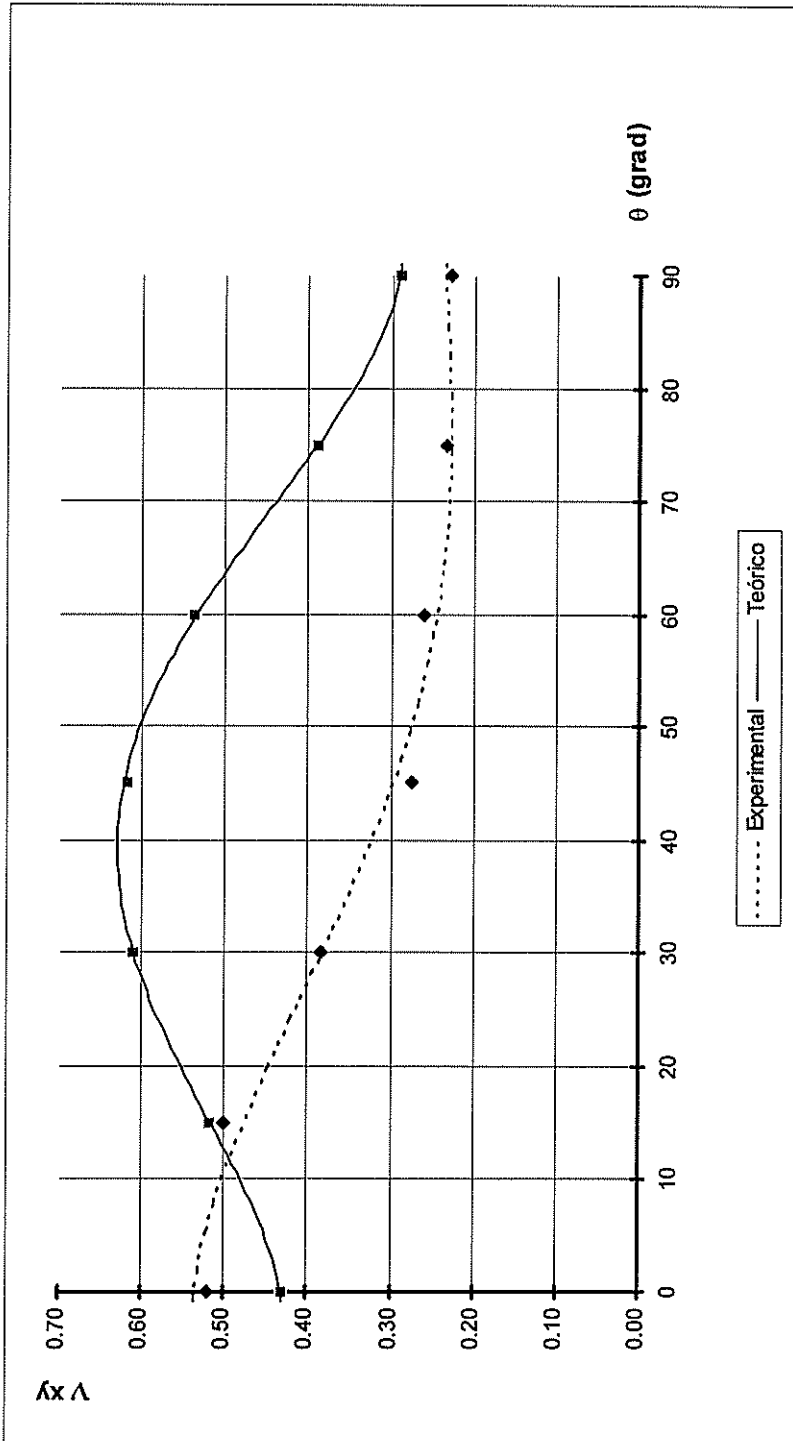


Figura 25
 Comparación Gráfica Teórica - Experimental de la Razón de Poisson para Material Resina - Caña

Los valores experimentales y los teóricos muestran una tendencia muy similar: crecen a partir de la dirección principal ($\theta = 0^\circ$), alcanzando un máximo para aproximadamente 45 grados, y luego empiezan a descender. Sin embargo, los valores experimentales obtenidos son muy diferentes de los teóricos, por un factor de 3 aproximadamente.



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARIST

3.4. MÓDULO DE CORTE

El Módulo de Corte (G_{xy}), en cualquier dirección respecto de los ejes principales 12, es determinada por la imposición de cargas cortantes sobre un espécimen de material compuesto. Los valores de desplazamiento producidos por este efecto son transformados en deformaciones angulares y las cargas aplicadas, en esfuerzo de corte. La transformación de estos valores se obtiene al dividir los valores de desplazamiento para el ancho de la probeta, obteniéndose de esta forma la deformación angular del espécimen ($\gamma_{xy} = \delta/a$), y al dividir los datos de carga para el producto (largo * espesor), resultan valores de esfuerzo cortante ($\tau_{xy}=P/bh$). La pendiente en la porción lineal de la curva τ_{xy} vs γ_{xy} es por definición el Módulo de Corte experimental:

$$G_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{P*a}{\delta*b*h} \quad (3.5)$$

donde:

P: carga lateral aplicada a la probeta de Material Compuesto,

d: desplazamiento, y,

a, b, y, h: Ancho, Largo, Espesor de la probeta respectivamente.

Debido a daños en la máquina de Ensayo Universal, no pudieron desarrollarse los ensayos de corte para el compuesto resina - caña guadua. Los valores experimentales obtenidos en cada uno de los otros dos materiales compuestos tratados son comparados con los correspondientes valores teóricos, obtenidos a través de la evaluación de la ecuación (1.13) para diferentes orientaciones con las correspondientes constantes de ingeniería para cada uno de los materiales fabricados. La tabla 21 recoge esta comparación.

Los valores de la tabla anterior son ploteados en las figuras 26 y 27.

| | | | | |
|--------------------------------|--|----------------|--------------------------------------|----------------|
| | $E_1=$ | 8.8e5 psi | $E_1=$ | 9.7e5 psi |
| | $E_2=$ | 7.9e5 psi | $E_2=$ | 9.7e5 psi |
| | $G_{12}=$ | 1.1e5 psi | $G_{12}=$ | 1.1e5 psi |
| | $\nu_{12}=$ | 0.43 | $\nu_{12}=$ | 0.43 |
| Orientación de la Fibra | Módulo de Corte Resina + Cabuya | | Módulo de Corte Resina + Yute | |
| | <i>Experimental</i> | <i>Teórico</i> | <i>Experimental</i> | <i>Teórico</i> |
| θ (Grados) | | | | |
| 0 | 9.98E+04 | 1.08E+05 | 1.09E+05 | 1.08E+05 |
| 15 | 1.07E+05 | 1.12E+05 | 1.03E+05 | 1.14E+05 |
| 30 | 1.20E+05 | 1.21E+05 | 9.24E+04 | 1.25E+05 |
| 45 | 9.59E+04 | 1.25E+05 | 1.63E+05 | 1.32E+05 |
| 60 | 1.05E+05 | 1.21E+05 | 9.85E+04 | 1.25E+05 |
| 75 | 2.88E+04 | 1.12E+05 | 1.08E+05 | 1.14E+05 |
| 90 | 4.70E+04 | 1.08E+05 | 7.74E+04 | 1.08E+05 |

Tabla 21
Valores experimentales y teóricos de Módulo de Corte para Materiales Compuesto empleando fibras naturales como refuerzo.



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARÍTIMA

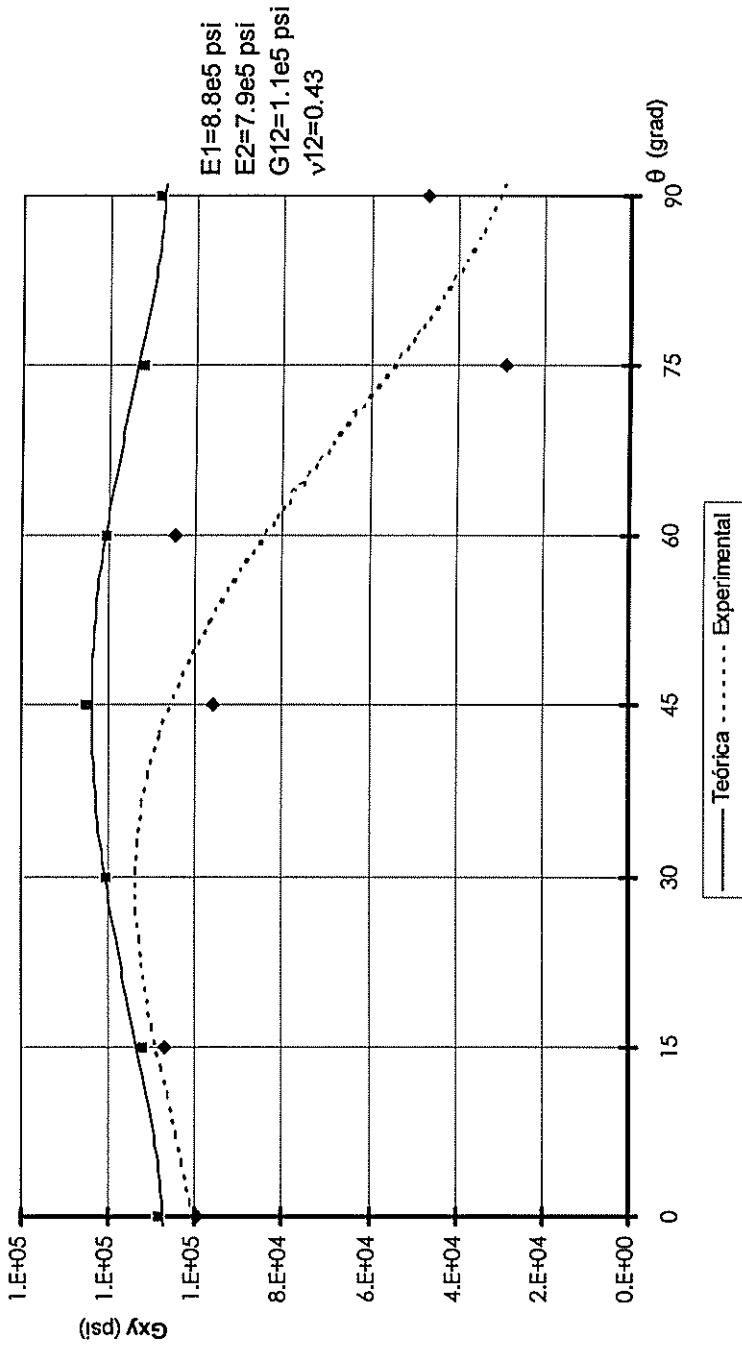


Figura 26
 Comparación Gráfica Teórica - Experimental del Modulo de Corte para Material Resina - Cabuya

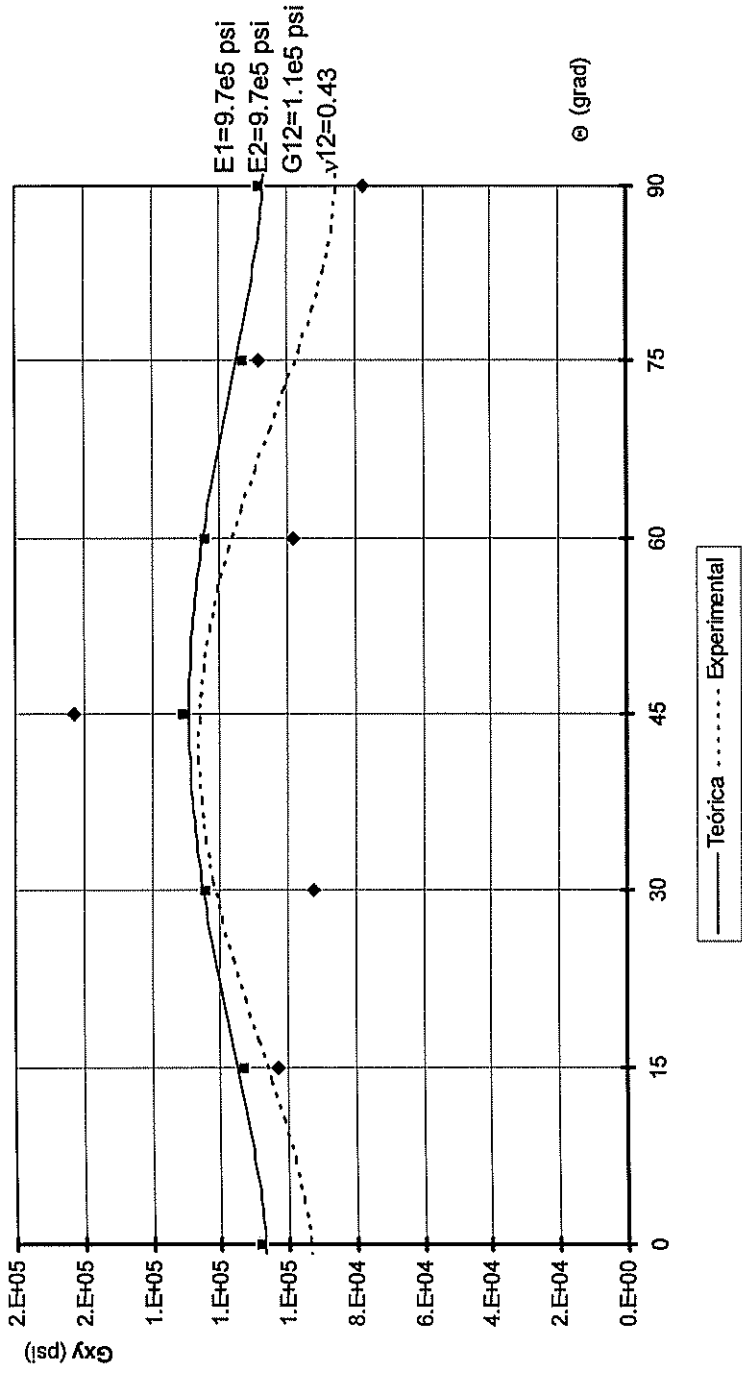


Figura 27
 Comparación Gráfica Teórica - Experimental del Modulo de Corte para Material Resina - Yute

Los resultados experimentales para el compuesto resina-yute muestran excelentes concordancia con los resultados analíticos empleando la ecuación (1.13), figura 27. A diferencia de ello, en el caso del compuesto empleando fibras de cabuya, las curvas teóricas y experimentales para bajos ángulos muestran muy buena concordancia, pero se separan conforme crece el ángulo de la aplicación de la carga, véase la figura 26.



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

3.5. ANÁLISIS DE RESISTENCIA

Para este análisis se registraron los valores de los dos puntos de falla que se obtuvieron en los ensayos de tracción, véase la figura 11, y que se transforman a valores de esfuerzo y deformación unitaria en la tabla 22 y 23. De acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 1.5, para analizar la resistencia del compuesto se preparó un gráfico deformación unitaria vs esfuerzo, y se incluyeron las curvas simplificadas de falla de los dos componentes: matriz y fibra. En esta figura se incorporaron los valores correspondientes a los dos puntos de falla, tomados de los ensayos, véase las figuras 28 y 29, para la Cabuya y el Yute, respectivamente.

Se puede notar en las figuras 28 y 29, que el primer punto de falla ① se concentra alrededor de las condiciones de ruptura de la matriz (resina epóxica). Sin embargo, el espécimen podía, luego de superar este primer salto, seguir incrementando la carga soportada. Finalmente el segundo punto de falla ② parece acercarse a las condiciones de rotura de la fibra.

| $\epsilon_{rotura} \cdot 10^{-3}$ (adimensional) | σ_{rotura} (ksi) | | |
|---|-------------------------|-----------------------|---------------|
| | <i>fibra</i> | <i>fibra + resina</i> | <i>resina</i> |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6.64 | | | 2.27 |
| 7.80 ^o | | 1.63 ^o | |
| 10.50 ^o | | 1.91 ^o | |
| 13.00 | 29.95 | | |

^opunto de falla de la resina en el compuesto

^opunto de falla de la fibra en el compuesto

Tabla 3.10

Deformación Unitaria y Esfuerzos de Rotura de la fibra , resina y Material Resina + Cabuya

| $\epsilon_{rotura} \cdot 10^{-3}$ (adimensional) | σ_{rotura} (ksi) | | |
|---|-------------------------|-----------------------|---------------|
| | <i>fibra</i> | <i>fibra + resina</i> | <i>resina</i> |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.28 ^o | | 0.84 ^o | |
| 5.40 ^o | | 1.10 ^o | |
| 6.64 | | | 2.27 |
| 15.00 | 35.43 | | |

^opunto de falla de la resina en el compuesto

^opunto de falla de la fibra en el compuesto

Tabla 3.11

Deformación Unitaria y Esfuerzos de Rotura de la fibra , resina y Material Resina + Yute

RESISTENCIA LONGITUDINAL (CABUYA)

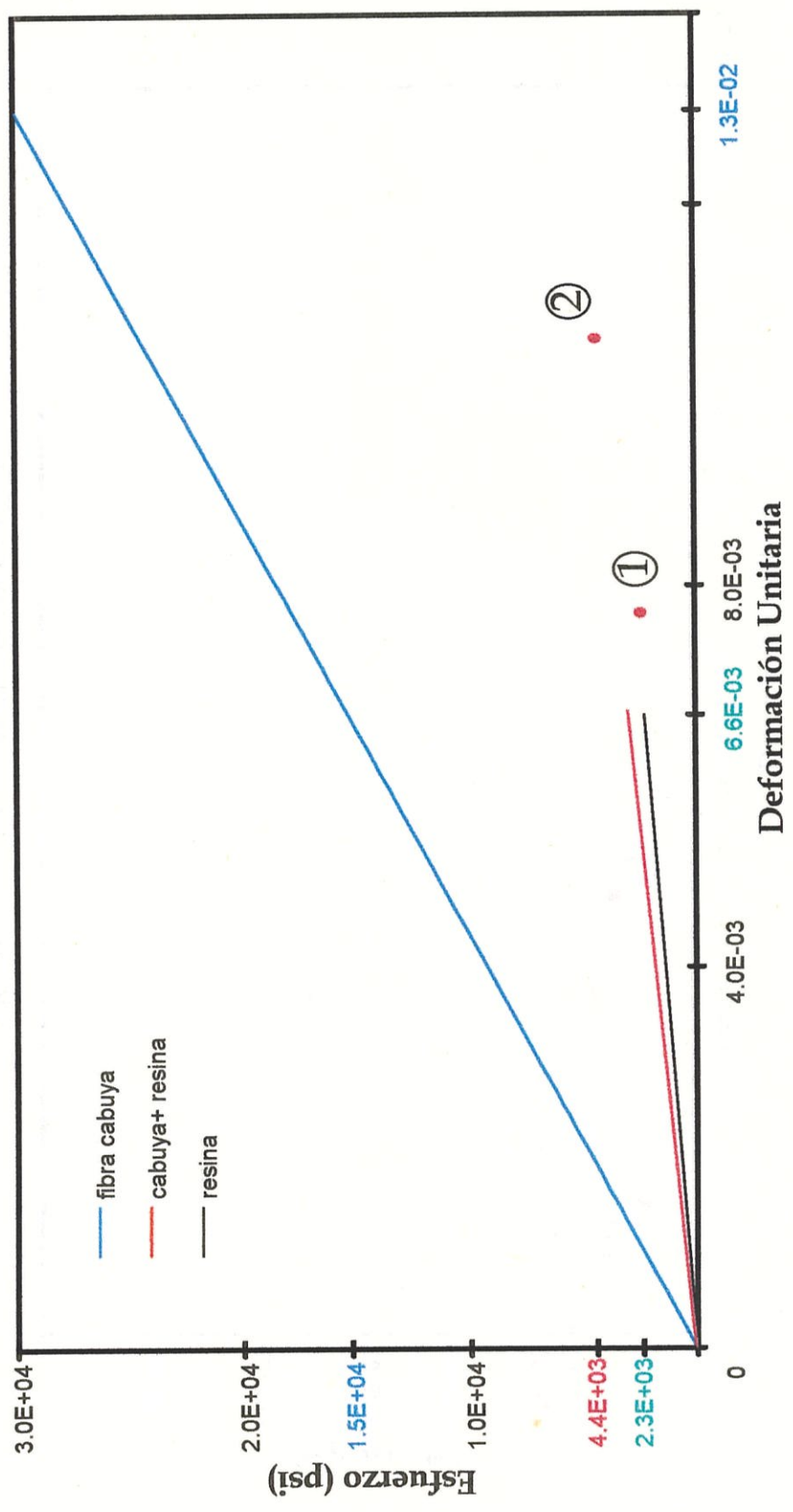


Figura 28

Curva Esfuerzo - Deformación para la fibra de cabuya, matriz y compuesto



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

RESISTENCIA LONGITUDINAL (YUTE)

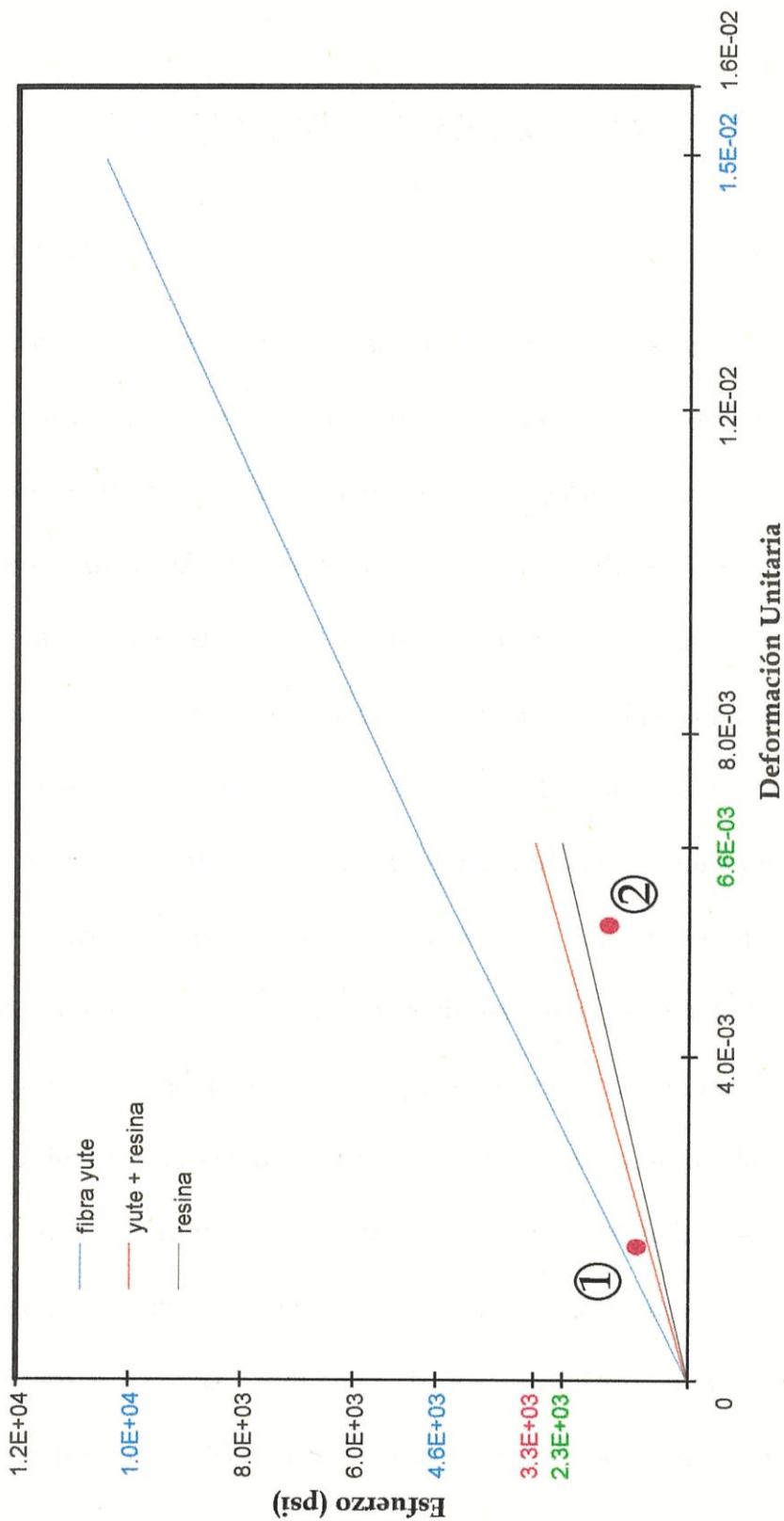


Figura 29

Curva Esfuerzo - Deformación para la fibra de yute, matriz y compuesto

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El trabajar con materiales compuestos significa un notorio incremento en complejidad, tanto en el análisis como en la parte de construcción en sí. El tratar con materiales ortotrópicos, implica entre otras dificultades, una dependencia de las propiedades elásticas, respecto de la dirección de análisis, lo que va a complicar el proceso de diseño; además, las propiedades individuales y la proporción de los componentes incide en el comportamiento del compuesto resultante. Sin embargo, el problema no termina ahí; el tener que "construir el material", implica la posibilidad de cometer errores con resultados como excesiva porosidad porque la resina no se embebe adecuadamente en la fibra, presencia de excesiva cantidad de burbujas de aire, proporción inadecuada de componentes para la resina que dificulta su endurecimiento, mal estado ó presencia de excesiva humedad en la fibra, defectos en construcción que llevan a un irregular espesor de la plancha de compuesto, ó, deficiente "agarre" del compuesto al material del núcleo, en el caso del esquema tipo sanduche. Todos estos inconvenientes se pueden evitar con un riguroso plan de Control de Calidad durante el proceso de construcción.

Aún cuando los valores determinados experimentalmente para el módulo de Young y el esfuerzo de rotura de las fibras naturales, son inferiores a los de las fibras sintéticas, su costo muchas veces menor, las hace muy atractivas como material de refuerzo.

Las relaciones analíticas resumidas en la tabla 2, y que son las mínimas necesarias para proceder en un diseño básico empleando materiales compuestos, han sido comprobadas experimentalmente. La regla de las mezclas, fórmula práctica empleada por ejemplo en sus normas por la sociedad de clasificación Bureau Veritas, es extremadamente útil para determinar la cantidad de fibra requerida, conociendo la resistencia mínima que debe tener un elemento. Además, las relaciones Macromecánicas, que establecen las propiedades elásticas en función de los parámetros principales y la dirección de análisis, parecen proveer buena predicción de dichos valores, a excepción de la razón de Poisson.

Finalmente se pudo comprobar en forma directa la gran ventaja de los materiales compuestos, esto es, la baja relación peso/resistencia. En los ensayos de flexión, se había asumido que los especímenes tipo sanduche con núcleo de balsa, podrían llevarse hasta la "falla", con razonables niveles de

carga aplicada. Sin embargo, aún apilando gran cantidad de pesos, véase la foto 22, no se pudo lograr la falla de los especímenes.

RECOMENDACIONES

Es indudable la utilidad de los resultados de estos ensayos primarios, sin embargo, en algunos casos, no se pudo mantener la rigurosidad en las pruebas por falta de los equipos adecuados. En otros casos, el material ó los especímenes mostraban altísima variación, de manera que un plan más amplio en términos del número de probetas por cada prueba, y más riguroso en términos de los equipos empleados, debe seguir a esta primera experiencia en el área de Materiales Compuestos.

El éxito de la combinación matriz y fibra está en proveer suficiente área en la segunda para agarrarse a la primera. En el caso de las fibras de cabuya y yute, dado que se disponían en forma de hilos, este agarre fue adecuado. En el caso de la caña guadua, se prepararon unas primeras probetas, utilizando caña picada pasada por la máquina denominada “cepillo”, lo que produjo una especie de plancha de caña muy fina. Sin embargo, al formarse el compuesto con la resina, muy fácilmente se “delaminaba”. Habría que tratar de encontrar algún proceso mecánico para preparar esta fibra antes de ser

combinada con la matriz, dado que la caña es comúnmente empleada como material estructural en nuestro medio.

Existen otras fibras naturales que también podrían ser analizadas para formar la parte resistente de materiales compuestos. Específicamente se tiene conocimiento que la fibra Abacá está siendo incluida en la elaboración de cabos. Desafortunadamente, no se pudo conseguir dicha fibra en forma de "tela", requisito indispensable para formar un material compuesto razonablemente uniforme.



BIBLIOTECA
NACIONAL
GUATEMALA

APÉNDICE 1

DEDUCCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS E_x , E_y , G_{xy} Y ν_{xy}

A partir de las relaciones dadas en el Capítulo 2 de Gibson, [4], en cuanto a la relación esfuerzo-deformación (σ - ϵ), se obtendrán las fórmulas de las 4 constantes de ingeniería: E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy} en direcciones no principales, para una lámina compuesta con sus filamentos orientados en cualquier dirección θ . Aunque el término E_x es deducido por Gibson, en dicha referencia no se deducen los otros términos de la matriz S_{ij} , que están en relación con las 4 constantes. En este Apéndice se incluirá la deducción detallada de las restantes constantes.

Donde:

E_x = módulo de elasticidad longitudinal asociado con la dirección x ,

E_y = módulo de elasticidad longitudinal asociado con la dirección y ,

G_{xy} = módulo de corte asociado con la dirección xy , y,

ν_{xy} = razón de Poisson.

La Ley de Hooke para una lámina ortotrópica, ecuación (1.4), e introduciendo un factor 2 en el término S_{66} (o sea $1 / 2G_{12}$) para compensar por el uso de la deformación de corte en lugar del tensor ϵ_{12} , (o sea $\gamma_{12} / 2$) queda como:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} / 2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (01)$$

donde $[S]$ es la matriz flexibilidad, y los S_{ij} están definidos por:

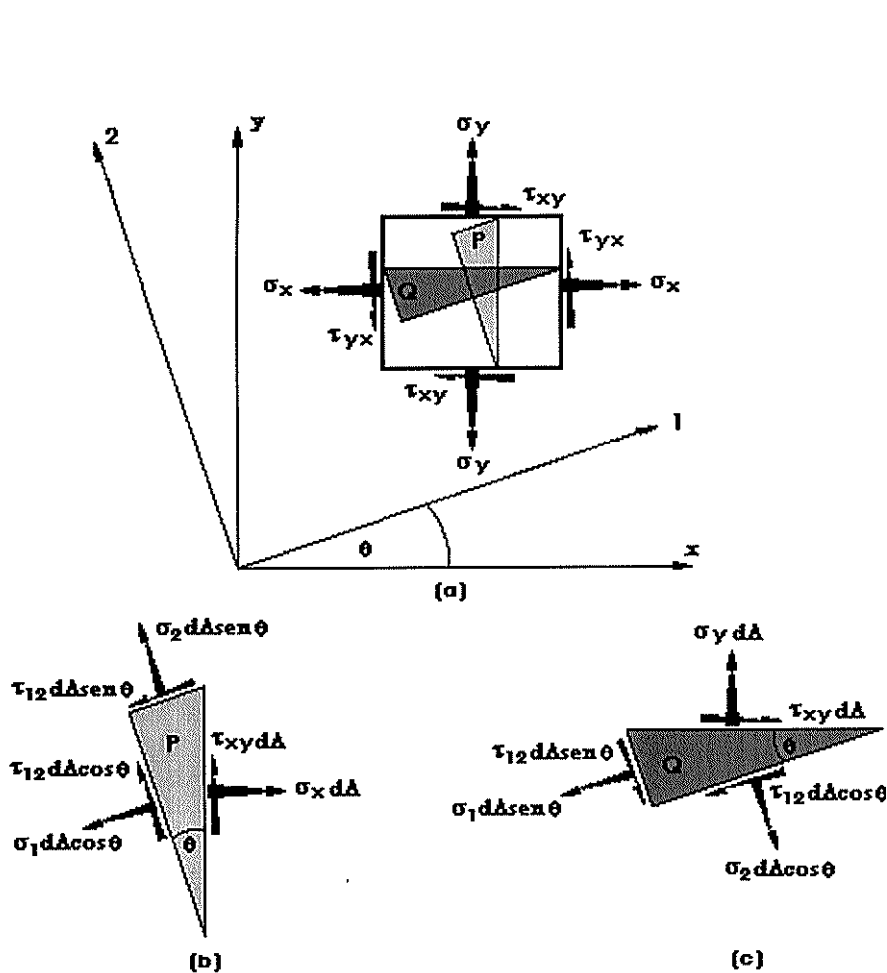
$$S_{11} = 1/E_1, \quad S_{22} = 1/E_2, \quad S_{12} = S_{21} = -\nu_{21}/E_2 = -\nu_{12}/E_1, \quad S_{66} = 1/G_{12} \quad (02)$$

LÁMINA GENERAL ORTOTRÓPICA

En el análisis de la lamina ortotrópica que tiene múltiples filamentos es necesario mostrar la relación deformación-esfuerzo en las coordenadas no principales x y y como se muestra en la figura 3.

La manera de resolver el problema de combinar esfuerzos normales con esfuerzos cortantes, es multiplicar los esfuerzos por las respectivas áreas en que actúan para obtener fuerzas, los cuales son vectores y en consecuencia se pueden sumar y restar vectorialmente.

El procedimiento para determinar los esfuerzos en ejes no principales es aislar una cuña P ó Q (véase la figura 30(a)) y aplicar las ecuaciones de equilibrio estático a las fuerzas que actúan en la cuña (véase la figura 30(b) y (c)).



BIBLIOTECA
NACIONAL
DE MEXICO

Figura 30

(a) Representación de los esfuerzos que actúan en un elemento de plancha; (b) y (c) cuñas o elementos para deducir las fórmulas de los esfuerzos en un sistema de ejes de coordenadas no principales

Para determinar σ_x y τ_{xy} aplicamos equilibrio estático a la cuña P en la dirección x y en y , entonces:

i) en x :

$$\sum F_x = \sigma_x dA - \sigma_1 dA \cos^2 \theta - \sigma_2 dA \sin^2 \theta + 2 \tau_{12} dA \sin \theta \cos \theta = 0 ,$$

y dividiendo para dA , y despejando σ_x queda como:

$$\sigma_x = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta - 2 \tau_{12} \sin \theta \cos \theta \quad (03)$$

ii) en y :

$$\sum F_y = \tau_{xy} dA - \sigma_1 dA \sin \theta \cos \theta + \sigma_2 dA \sin \theta \cos \theta - \tau_{12} dA (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) = 0 ,$$

y dividiendo para dA , y despejando τ_{xy} queda como:

$$\tau_{xy} = \sigma_1 \sin \theta \cos \theta - \sigma_2 \sin \theta \cos \theta + \tau_{12} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (04)$$

Y para determinar σ_y aplicamos equilibrio estático a la cuña Q en la dirección y , entonces:

$$\Sigma F_y = \sigma_y dA - \sigma_1 dA \sin^2 \theta - \sigma_2 dA \cos^2 \theta - 2 \tau_{12} dA \sin \theta \cos \theta = 0 ,$$

y dividiendo para dA , y despejando σ_y queda como:

$$\sigma_y = \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta + 2 \tau_{12} \sin \theta \cos \theta \quad (05)$$

Entonces los esfuerzos en el sistema de coordenadas xy (ecuación (03), (04) y (05)) pueden ser desarrollados y escritos en forma de matriz, como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

y los esfuerzos en el sistema 12 pueden ser escritos como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (06)$$

Donde $c = \cos \theta$, $s = \sin \theta$, y la matriz transformación $[T]$ puede ser calculada encontrando la inversa de la matriz transformación del sistema de esfuerzos xy al sistema de esfuerzos 12 , o sea:

$$[T] = [[T]^{-1}]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$



BIBLIOTECA
FAC. INGEN.
MEXICO

y la deformación es calculada de la misma manera como los esfuerzos, entonces:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} \quad (07)$$

sustituyendo la ecuación (06) y (07) en la ecuación (01) nos queda:

$$[T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = [S] [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

despejando, queda como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = [\mathbf{T}]^{-1} [\mathbf{S}] [\mathbf{T}] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

multiplicando matrices y eliminando el 2 en el denominador , nos queda que:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (08)$$

donde los \bar{S}_{ij} son las componentes de la matriz transformación flexibilidad de la lámina, definidas como:

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + S_{22} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{S}_{12} = (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + S_{22} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta$$

$$\bar{S}_{66} = (2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

Las constantes de ingeniería de la lámina pueden ser también transformadas desde los ejes del material principal a las coordenadas de los ejes no principales. Por ejemplo, el módulo de elasticidad asociado con la carga uniaxial en la dirección x está definido como:

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{\sigma_x}{\bar{S}_{11} \sigma_x} = \frac{1}{\bar{S}_{11}}, \quad (09)$$

donde la deformación ε_x en el denominador fue encontrada por sustituir las condiciones de esfuerzos $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$, en la ecuación (08) y reemplazando \bar{S}_{11} en la ecuación (09), encontramos que:

$$E_x = \frac{1}{\frac{1}{E_1} c^4 + \frac{1}{E_2} s^4 + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2}, \quad (10)$$

que corresponde a la ecuación (2.39) de Gibson, [4], y, a la ecuación (11-022-13) de Bureau Veritas, [2].

El módulo de elasticidad asociado con la carga uniaxial en la dirección y está definido como:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma_y}{\bar{S}_{22}\sigma_y} = \frac{1}{\bar{S}_{22}}, \quad (11)$$

donde la deformación ε_y en el denominador fue encontrada por sustituir las condiciones de esfuerzos $\sigma_y \neq 0$, $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$, en la ecuación (08) y reemplazando \bar{S}_{22} en la ecuación (11), encontramos que:

$$E_y = \frac{1}{\frac{1}{E_1}s^4 + \frac{1}{E_2}c^4 + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2c^2} \quad (12)$$

El módulo de corte asociado con la carga uniaxial en la dirección xy está definido como:



$$G_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{\tau_{xy}}{\bar{S}_{66} \tau_{xy}} = \frac{1}{\bar{S}_{66}}, \quad (13)$$

BIBLIOTECA
IAC, ING.
MATERIALIA

donde la deformación γ_{xy} en el denominador fue encontrada al sustituir las condiciones de esfuerzos $\tau_{xy} \neq 0$, $\sigma_x = \sigma_y = 0$, en la ecuación (08) y reemplazando \bar{S}_{66} en la ecuación (13), encontramos que:

$$G_{xy} = \frac{1}{\left[\frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} + \frac{4\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] 2s^2 c^2 + \frac{1}{G_{12}} (c^4 + s^4)} \quad (14)$$

Y la razón de Poisson está definida como:

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\bar{S}_{12} \sigma_x}{\bar{S}_{11} \sigma_x} = -\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{11}}, \quad (15)$$

donde las deformaciones, ε_y en el numerador, y, ε_x en el denominador fueron encontradas al sustituir las condiciones de esfuerzos $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$, en la ecuación (08), reemplazando \bar{S}_{12} y \bar{S}_{11} en la ecuación (15), encontramos que:

$$v_{xy} = - \frac{\left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2 - \frac{\nu_{12}}{E_1} (c^4 + s^4)}{\frac{1}{E_1} c^4 + \frac{1}{E_2} s^4 + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right] s^2 c^2} \quad (16)$$

APÉNDICE 2

DEDUCCIÓN DE FÓRMULAS UTILIZADAS EN LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN

A continuación se desarrolla la deducción de las fórmulas usadas en el análisis de las vigas de material sandwich; dichas expresiones son empleadas en la determinación del módulo de elasticidad para diferentes direcciones de alineamiento de las fibras del material. La disposición de los elementos empleados se ilustra en la siguiente figura.

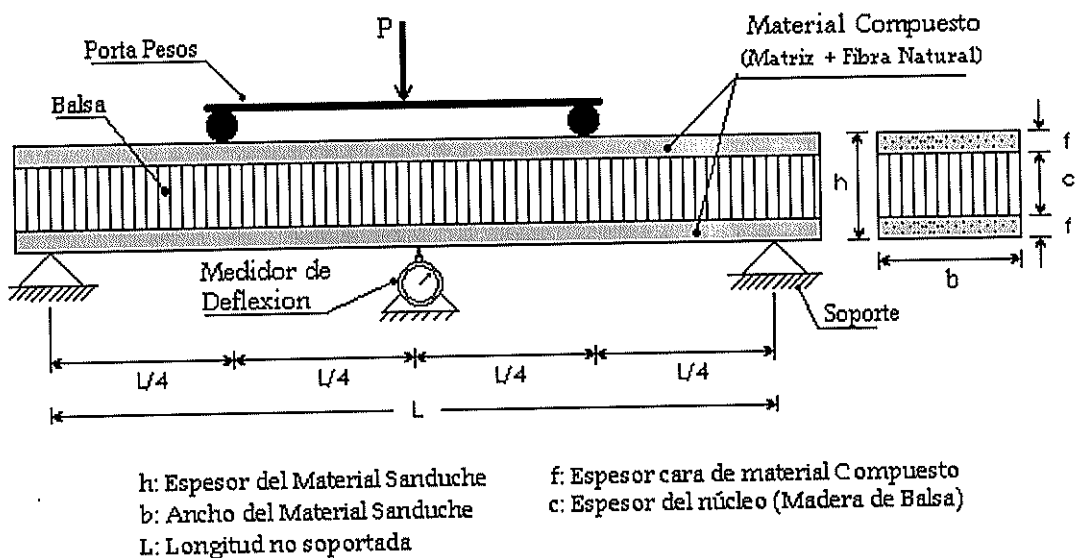


Figura 31
Dispositivo para prueba de flexión

Recordemos la ecuación diferencial para la deformación de vigas elásticas, en el caso estáticamente determinado, [6]:

$$EI w_{xx} = M(x), \quad (01)$$

donde: EI = Rigidez flexural,

$M(x)$ = Momento flector, y,

w = Deflexión de la elástica.



BIBLIOTECA
IAC. ING.
N.º 6011-10-00

Una expresión analítica para el momento flector de una viga cargada discontinuamente, figura 31, se puede hallar resolviendo la ecuación diferencial $d^2M/dx^2=p(x)$. Empleando la notación del cálculo operacional tenemos que:

$$M(x) = -\frac{P}{2} \left(x - \frac{L}{4}\right) E \left[x - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{2} \left(x - \frac{3L}{4}\right) E \left[x - \frac{3L}{4}\right] + C_1 x + C_2 \quad (02)$$

En esta ecuación se emplea la función escalón $E[x - a]$, que es igual a 0 para $x < a$, e, igual a 1 para $x > a$.

Evaluemos la expresión anterior en las condiciones de frontera que se ilustran en la figura 32, con el fin de determinar las constantes C_1 y C_2 .

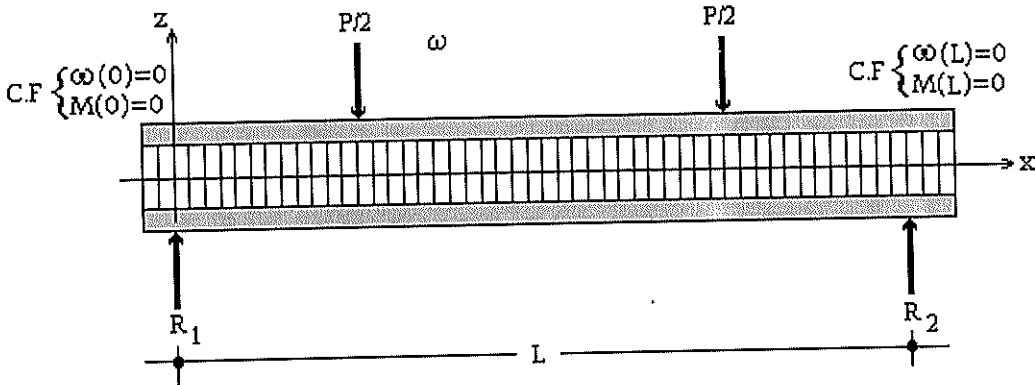


Figura 32
Diagrama del cuerpo libre

Para satisfacer las condiciones de frontera,

$$M(0) = -\frac{P}{2}\left(0 - \frac{L}{4}\right) E\left[0 - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{2}\left(0 - \frac{3L}{4}\right) E\left[0 - \frac{3L}{4}\right] + C_1 \cdot 0 + C_2 ;$$

de tal manera que \$C_2=0\$, y,

$$M(L) = -\frac{P}{2}\left(L - \frac{L}{4}\right) E\left[L - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{2}\left(L - \frac{3L}{4}\right) E\left[L - \frac{3L}{4}\right] + C_1(L) ;$$

entonces, \$C_1 = P/2\$.

Reemplazando los valores de \$C_1\$ y \$C_2\$ en la ecuación (02), se obtiene la expresión para evaluar \$M\$:

$$M(x) = -\frac{P}{2}\left(x - \frac{L}{4}\right) E\left[x - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{2}\left(x - \frac{3L}{4}\right) E\left[x - \frac{3L}{4}\right] + \frac{P}{2} x \quad (03)$$

Sustituyendo la expresión anterior en la ecuación (01) e integrando dos veces la expresión resultante (recuérdese que EI permanece constante a lo largo de la viga), se encuentra una expresión para la curva de la elástica $w(x)$.

$$EI w(x) = -\frac{P}{12} \left(x - \frac{L}{4}\right)^3 E \left[x - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{2} \left(x - \frac{3L}{4}\right)^3 E \left[x - \frac{3L}{4}\right] + \frac{P}{12} x^3 + Ax + B \quad (04)$$

Y las constantes de integración A y B, se encuentran de la evaluación de w en las condiciones de frontera descritas en la figura 32. Entonces:

$$EI w(0) = -\frac{P}{12} \left(0 - \frac{L}{4}\right)^3 E \left[0 - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{2} \left(0 - \frac{3L}{4}\right)^3 E \left[0 - \frac{3L}{4}\right] + \frac{P}{12} (0)^3 + A(0) + B = 0 ,$$

luego, $B = 0$.

$$EI w(L) = -\frac{27}{768} P L^3 - \frac{PL^3}{768} + \frac{PL^3}{12} + A(L) = 0$$

luego,

$$A = -\frac{3}{64} P L^2$$

Reemplazando, los valores de A y B, en la ecuación (04) y despejando $w(x)$, obtenemos:

$$w(x) = \frac{-\frac{P}{12} \left(x - \frac{L}{4}\right)^3 E \left[x - \frac{L}{4}\right] - \frac{P}{12} \left(x - \frac{3L}{4}\right)^3 E \left[x - \frac{3L}{4}\right] + \frac{P}{12} x^3 - \frac{3}{64} P L^2 x}{EI} \quad (05)$$

Recordemos que de los ensayos de flexión se han determinado valores de la deflexión de la elástica en la mitad de longitud no soportada ($w(L/2)$), para

diferentes condiciones de carga. Esto nos permite evaluar la ecuación (05) en $L/2$, con la finalidad de hallar una ecuación para el módulo de elasticidad.

Así tenemos que:

$$w_{L/2} = \frac{-\frac{P}{768}L^3 + \frac{P}{96}L^3 - \frac{3}{128}PL^3}{EI} = -\frac{11PL^3}{768EI}$$



BIBLIOTECA
TAC, S.C.
MARIQUITA

De manera que:

$$E = -\frac{11PL^3}{768 I w_{L/2}} \quad (06)$$

Y la Inercia transversal está dada por la expresión $I = \iint z^2 dA$, siendo $dA = b dz$, en el caso de una sección rectangular.

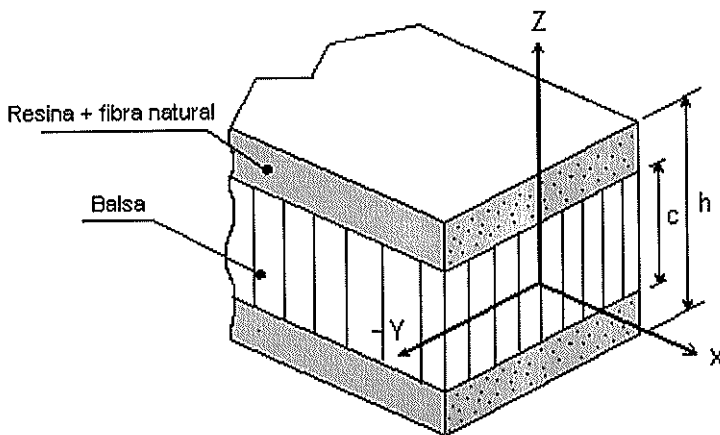


Figura 33
Corte transversal de la viga de material Sanduche

Definiendo los límites de integración de acuerdo a la sección transversal

mostrada en la figura 33, $I = 2b \int_{c/2}^{h/2} z^2 dz$, y despreciando la contribución del

material del núcleo, esto es balsa, hallamos una expresión para la inercia transversal de una viga de material sandwich:

$$I = 2b \left(\frac{h^3}{24} - \frac{c^3}{24} \right) = \frac{b}{12} (h^3 - c^3) \quad (07)$$

Reemplazando ecuación (07) en (06), hallamos la expresión que se utiliza en las pruebas de flexión:

$$E = -0.172 \frac{mL^3}{b(h^3 - c^3)l} \quad (08)$$

Donde m , es la pendiente en el inicio de la curva P vs W , obtenida en la prueba de flexión.

Esta fórmula es igual a la 5b de la página 303 de la referencia [ASTM D790] excepto en la expresión para la inercia, que en nuestro caso no considera el efecto realizado por el núcleo.

Por otra parte, si evaluamos la ecuación (03) en los puntos de la viga donde se aplica la carga ($x=L/4$ y $x=3L/4$) y en los extremos de la misma, hallamos el gráfico de distribución de momento flector a lo largo de la luz no soportada de la viga de material sandwich, figura 34.

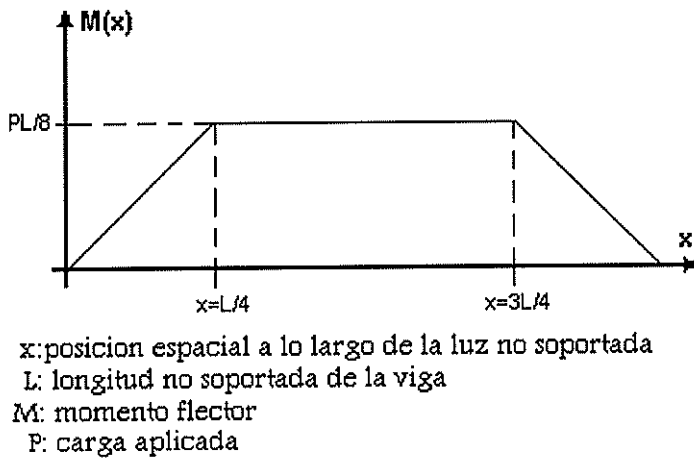


Figura 34
Distribución de Momento Flector

Expresemos el módulo de Young, en función del esfuerzo (σ_x) y deformación unitaria (ϵ_x) en sentido axial (Ley de Hooke para un material isotrópico que está soportando esfuerzo en sentido axial).

$$E = \sigma_x / \epsilon_x, \quad (09)$$

y recordemos la fórmula de la flexión elástica para una viga [6]:

$$\sigma_x = -My/I \quad (10)$$

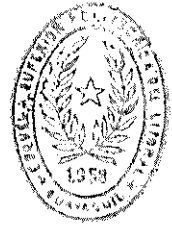
Reemplazando la ecuación (10) en (09), obtenemos la siguiente expresión

$$E = -My / I \epsilon_x,$$

donde el valor de M en el centro de la viga $x=L/2$ es $PL/8$ (véase figura 34) y el valor de “ y ” es el correspondiente a la mitad de espesor de la viga ($y=h/2$), como se puede observar en el corte transversal de la viga de material sandwich presentado en la figura 33. La expresión final del Modulo de Elasticidad que se utiliza en las pruebas de flexión será de la siguiente forma:

$$E = - \frac{mLh}{16I} \quad (11)$$

Donde m , es la pendiente en el inicio de la curva P vs e_x obtenida en la prueba de flexión, e I corresponde a la ecuación (07)



APENDICE 3

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS (Resumen)

PRUEBA DE TENSION HILOS DE CABUYA

BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARILLAN

Probeta # 1

Longitud 30 mm
Diámetro 0.180 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0.000 | 30 | 0.026 | 0.000E+00 | 0 |
| 0.05 | 0.125 | 30 | 0.026 | 4.167E-03 | 2788 |
| 0.1 | 0.260 | 30 | 0.026 | 8.667E-03 | 5576 |
| 0.15 | 0.600 | 30 | 0.026 | 2.000E-02 | 8364 |

Eexp= 8.04E+05 psi

Probeta # 2

Longitud 30 mm
Diámetro 0.148 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0.00 | 30 | 0.02 | 0.000E+00 | 0 |
| 0.1 | 0.10 | 30 | 0.02 | 3.333E-03 | 8322 |
| 0.15 | 0.21 | 30 | 0.02 | 7.000E-03 | 12483 |
| 0.2 | 0.45 | 30 | 0.02 | 1.500E-02 | 16644 |
| 0.25 | 0.63 | 30 | 0.02 | 2.100E-02 | 20805 |

Eexp= 1.79E+06 psi

Probeta # 3

Longitud 30 mm
Diámetro 0.236 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0.000 | 0.000 | 30 | 0.044 | 0.000 | 0 |
| 0.100 | 0.070 | 30 | 0.044 | 0.002 | 3244 |
| 0.200 | 0.155 | 30 | 0.044 | 0.005 | 6488 |
| 0.250 | 0.200 | 30 | 0.044 | 0.007 | 8110 |
| 0.300 | 0.265 | 30 | 0.044 | 0.009 | 9732 |
| 0.350 | 0.330 | 30 | 0.044 | 0.011 | 11354 |
| 0.450 | 0.330 | 30 | 0.044 | 0.011 | 14598 |

Eexp= 1.47E+06 psi

Probeta # 4**Longitud** 30 mm**Diámetro** 0.133 mm

| P Kg | δ mm | L_0 mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0.000 | 0.000 | 30 | 0.044 | 0.000E+00 | 0 |
| 0.100 | 0.055 | 30 | 0.044 | 1.833E-03 | 3244 |
| 0.200 | 0.120 | 30 | 0.044 | 4.000E-03 | 6488 |
| 0.250 | 0.185 | 30 | 0.044 | 6.167E-03 | 8110 |
| 0.300 | 0.240 | 30 | 0.044 | 8.000E-03 | 9732 |
| 0.350 | 0.300 | 30 | 0.044 | 1.000E-02 | 11354 |
| 0.450 | 0.470 | 30 | 0.044 | 1.567E-02 | 14598 |

Eexp= 4.75E+06 psi

Probeta # 5**Longitud** 30 mm**Diámetro** 0.206 mm

| P Kg | δ mm | L_0 mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0.000 | 0.000 | 30 | 0.033 | 0.000E+00 | 0 |
| 0.250 | 0.120 | 30 | 0.033 | 4.000E-03 | 10640 |
| 0.350 | 0.180 | 30 | 0.033 | 6.000E-03 | 14897 |
| 0.450 | 0.250 | 30 | 0.033 | 8.333E-03 | 19153 |
| 0.550 | 0.330 | 30 | 0.033 | 1.100E-02 | 23409 |
| 0.600 | 0.410 | 30 | 0.033 | 1.367E-02 | 25537 |
| 0.650 | 0.490 | 30 | 0.033 | 1.633E-02 | 27665 |
| 0.700 | 0.770 | 30 | 0.033 | 2.567E-02 | 29793 |

Eexp= 2.71E+06 psi

Probetas de tela de CABUYA

| | Probeta No 3 | Probeta No 4 | Probeta No 5 | Promedio |
|---|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Peso de la tela, P_T (gr) | 4.6779 | 4.798 | 5.4847 | 4.98686667 |
| Peso de las fibras en la dirección 1 (Hilos Gruesos) P_1 (gr) | 3.39 | 3.2646 | 3.7831 | 3.479233333 |
| Peso de las fibras en la dirección 2 (Hilos Finos) P_2 (gr) | 1.253 | 1.3538 | 1.4357 | 1.3475 |
| Area A (mm ²) | 1.E+04 | 1.E+04 | 1.E+04 | 10000 |
| Peso por unidad de area Π_f (gr/mm ²) | 4.68E-04 | 4.80E-04 | 5.48E-04 | 4.99E-04 |
| Razón de las fibras en dirección 1 y 2 r | 0.730 | 0.707 | 0.725 | 0.721 |



BIBLIOTECA
IAS, INC.
MARITIMA

| Cálculo de V_f (hilos de cabuya) | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|----------|
| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 | Promedio |
| Area=LxB | 4899.9711 | 4853.1 | 4946.985 | |
| Largo | 70.17 | 70 | 70.5 | |
| Ancho | 69.83 | 69.33 | 70.17 | |
| Espesor | 4 | 4.68 | 3.38 | |
| Densidad de la fibra | 1.035E-03 | 1.035E-03 | 1.035E-03 | |
| Peso por unidad de area | 4.99E-04 | 4.99E-04 | 4.99E-04 | |
| Peso de la fibra | 2.444 | 2.420 | 2.467 | |
| Razón de las fibras en dirección 1 y 2 | 0.721 | 0.721 | 0.721 | |
| Peso de la fibra dirección 1 | 1.761 | 1.744 | 1.778 | |
| Peso de la fibra dirección 2 | 0.683 | 0.676 | 0.689 | |
| Area de la fibra en la sección 1 | 24.240 | 24.067 | 24.358 | |
| Area de la fibra en la sección 2 | 9.443 | 9.420 | 9.487 | |
| Razón de volúmen en dirección 1 | 0.087 | 0.074 | 0.103 | 0.088 |
| Razón de volúmen en dirección 2 | 0.034 | 0.029 | 0.040 | 0.034 |
| Razón de volúmen en matriz 1 | 0.913 | 0.926 | 0.897 | 0.912 |
| Razón de volúmen en matriz 2 | 0.966 | 0.971 | 0.960 | 0.966 |

Calculo del E1 y E2

| | E _m | E _f | E ₁ (psi) | E ₂ (psi) |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Modulo de Young de la matriz | 3.50E+05 | 3.50E+05 | 3.50E+05 | 3.50E+05 |
| Modulo de Young de la fibra | 2.30E+06 | 2.30E+06 | 2.30E+06 | 2.30E+06 |
| Modulo de Young direccion 1 | 8.80E+05 | 8.53E+05 | 9.12E+05 | 8.818E+05 |
| Modulo de Young direccion 2 | 7.93E+05 | 7.80E+05 | 8.11E+05 | 7.947E+05 |

Calculo densidad de la fibra
 Probetas de hilo de Cabuya

| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 | Probeta No 4 | Probeta No 5 | Probeta No 6 | Probeta No 7 | Promedio |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| | 20.5 | 20.05 | 20.05 | 18.5 | 17 | 12 | 14 | |
| | 22 | 23 | 18 | 18 | 17.5 | 12.5 | 11.5 | |
| | 21 | 21.5 | 20.05 | 14.5 | 18 | 13.5 | 13 | |
| | 20 | 22 | 22 | 15 | 16 | 11.5 | 13 | |
| | 18 | 23 | 17.5 | 13.5 | 15 | 13 | 14.5 | |
| | 21 | 18 | 17 | 12 | 16 | 13.5 | 15 | |
| | 21 | 19.5 | 18 | 14 | 15 | 14.5 | 13 | |
| | 21.5 | 20 | 17 | 11 | 15 | 14 | 14 | |
| | 23.5 | 16.5 | 16.5 | 13 | 16.5 | 14 | 14 | |
| | 24.5 | 19.5 | 17 | 13 | 16.5 | 16.5 | 12 | |
| | 23 | 18.5 | 15 | 12 | 16 | 16 | 15 | |
| | 23 | 18 | 15 | 12 | 19.5 | 14 | 13.5 | |
| | 20 | 19.5 | 16 | 12 | 17.5 | 13.5 | 13 | |
| | 18 | 20 | 13 | 11.5 | 16 | 13 | 14 | |
| | 18 | 18 | 20.05 | 13.5 | 16 | 13.5 | 11 | |
| ϕ (mm) | 21.00 | 19.80 | 17.48 | 13.57 | 16.50 | 13.67 | 13.37 | 16.483 |
| L (mm) | 200 | 200 | 200 | 150 | 200 | 250 | 200 | |
| P (gr) | 0.0055 | 0.0047 | 0.0035 | 0.0046 | 0.0039 | 0.0038 | 0.0025 | 0.004 |
| ρ (gr/mm ³) | 0.00079397 | 0.00076296 | 0.00072951 | 0.00212144 | 0.00091196 | 0.00103616 | 0.00089079 | 1.035E-03 |



**PRUEBAS DE FLEXIÓN
MATERIAL SANDUCHE : CABUYA + Balsa**

FISICA
FACULTAD DE CIENCIAS
MEXICALCO

90 grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| W (Kg) | ω mm | ω mm | ω mm |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.257 | 0.245 | 0.165 |
| 2 | 0.503 | 0.580 | 0.540 |
| 3 | 0.745 | 0.895 | 0.790 |
| 4 | 1.010 | 1.240 | 1.050 |
| 0 | 0.160 | 0.130 | 0.150 |
| 1 | 0.400 | 0.470 | 0.535 |
| 2 | 0.820 | 0.800 | 0.850 |
| 3 | 0.825 | 1.070 | 1.025 |
| m (Lb/pl) | 231.608 | 176.780 | 184.148 |

G.F=2.04
CARGA

DESCARGA

75. grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| W (Kg) | ω mm | ω mm | ω mm |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.295 | 0.220 | |
| 2 | 0.575 | 0.460 | |
| 3 | 0.860 | 0.680 | |
| 4 | 1.160 | 0.961 | |
| 0 | 0.260 | 0.180 | |
| 1 | 0.550 | 0.432 | |
| 2 | 0.800 | 0.670 | |
| 3 | 1.020 | 0.840 | |
| m (Lb/pl) | 194.803 | 231.689 | |

G.F=2.07
CARGA

DESCARGA

60 grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| W (Kg) | ω mm | ω mm | ω mm |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.210 | 0.355 | 0.220 |
| 2 | 0.480 | 0.690 | 0.482 |
| 3 | 0.770 | 0.975 | 0.680 |
| 4 | 1.150 | 1.330 | 0.950 |
| 0 | 0.110 | 0.215 | 0.045 |
| 1 | 0.410 | 0.630 | 0.440 |
| 2 | 0.720 | 0.935 | 0.685 |
| 3 | | 1.170 | 0.890 |
| m (Lb/pl) | 198.666 | 167.891 | 215.789 |

G.F=2.04
CARGA

DESCARGA

45. grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| W (Kg) | ω mm | ω mm | ω mm |
| 0 | 0.00E+00 | 0.000 | 0.00E+00 |
| 1 | 0.170 | | |
| 2 | 0.360 | | |
| 3 | 0.560 | | |
| 4 | 0.710 | | |
| 0 | 0.070 | | |
| 1 | 0.290 | | |
| 2 | 0.470 | | |
| 3 | 0.6 | | |
| m (Lb/pl) | 306.836 | | |

G.F=2.07
CARGA

DESCARGA

30 grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| W (Kg) | ω mm | ω mm | ω mm |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.170 | | |
| 2 | 0.310 | | |
| 3 | 0.440 | | |
| 4 | 0.660 | | |
| 0 | 0.110 | | |
| 1 | 0.280 | | |
| 2 | 0.410 | | |
| 3 | 0.560 | | |
| m (Lb/pl) | 352.467 | | |

G.F=2.07
CARGA

DESCARGA

15. grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| W (Kg) | ω mm | ω mm | ω mm |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.135 | 0.160 | |
| 2 | 0.270 | 0.320 | |
| 3 | 0.420 | 0.480 | |
| 4 | 0.570 | 0.600 | |
| 0 | 0.110 | 0.200 | |
| 1 | 0.265 | 0.350 | |
| 2 | 0.390 | 0.500 | |
| 3 | 0.500 | 0.630 | |
| m (Lb/pl) | 391.356 | 315.532 | |

G.F=2.07
CARGA

DESCARGA

0 grados

| | probeta #1 | probeta #2 | probeta #3 |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| W (Kg) | $\omega \times 10^{-2}$ mm | $\omega \times 10^{-2}$ mm | $\omega \times 10^{-2}$ mm |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0 |
| 1 | 0.080 | 0.230 | |
| 2 | 0.190 | 0.385 | |
| 3 | 0.300 | 0.528 | |
| 4 | 0.410 | 0.665 | |
| 0 | 0.040 | 0.295 | |
| 1 | 0.160 | 0.420 | |
| 2 | 0.260 | 0.525 | |
| 3 | 0.360 | 0.620 | |
| m (Lb/pl) | 529.521 | 327.911 | |

G.F=2.07
CARGA

DESCARGA

**CALCULO EXPERIMENTAL DEL MODULO DE ELASTICIDAD
PRUEBAS DE FLEXION - MATERIAL SANDUCHE : CABUYA + BALSA**

| Constants | | Orientacion 0= 90 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|----------|----------|------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 231.61 | 176.78 | 184.15 | 20321.9 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.94 | 0.98 | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.06 | 1.07 | 1.07 | 1.06 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.13 |
| Core thickness | e (plg) | 0.80 | 0.83 | 0.84 | 0.80 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 2.24E+05 | 1.92E+05 | 1.97E+05 | 3.7E+05 |

| Constants | | Orientacion 0= 75 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|----------|--------|----------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 ** |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 194.80 | 231.69 | dañada | 16930.03 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | " | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 1.02 | 1.02 | " | 1.02 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.07 | 1.06 | " | 1.07 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.13 | 0.11 | " | 0.13 |
| Core thickness | e (plg) | 0.82 | 0.83 | " | 0.82 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 1.81E+05 | 2.43E+05 | | 3.0E+05 |

| Constants | | Orientacion 0= 60 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|----------|----------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 ** |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 198.67 | 167.89 | 215.79 | 18339.04 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.96 | 1.00 | 0.98 | 0.96 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.07 | 1.06 | 1.06 | 1.07 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Core thickness | e (plg) | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 2.06E+05 | 1.78E+05 | 2.32E+05 | 3.6E+05 |

| Constants | | Orientacion 0= 45 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|--------|--------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 ** |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 306.84 | dañada | dañada | 20398.24 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | " | " | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | " | " | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.06 | " | " | 1.06 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.15 | " | " | 0.15 |
| Core thickness | e (plg) | 0.75 | " | " | 0.75 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 2.68E+05 | | | 3.4E+05 |

| Constants | | Orientacion 0= 30 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|--------|--------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 352.47 | dañada | dañada | 25090.22 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | " | " | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | " | " | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.02 | " | " | 1.02 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.12 | " | " | 0.12 |
| Core thickness | c (plg) | 0.78 | " | " | 0.78 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 3.92E+05 | | | 5.1E+05 |

| Constants | | Orientacion 0= 15 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|----------|-----|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 298.07 | 313.37 | | 31978.71 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.98 | | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.06 | 1.02 | | 1.06 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.13 | 0.12 | | 0.13 |
| Core thickness | c (plg) | 0.80 | 0.79 | | 0.80 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 3.91E+02 | 3.16E+02 | | 6.1E+05 |

| Constants | | Orientacion 0= 0 grados | | | |
|--------------------------------------|------------|-------------------------|----------|--------|------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 355.71 | 299.39 | dañada | 38695.91 * |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | " | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.99 | 0.98 | " | 0.99 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.10 | 1.13 | " | 1.10 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.14 | 0.14 | " | 0.14 |
| Core thickness | c (plg) | 0.82 | 0.85 | " | 0.82 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 5.30E+02 | 3.28E+02 | | 6.6E+05 |



CALCULO EXPERIMENTAL DEL MODULO DE CORTE: CABUYA + RESINA

Orientacion 0 grados

BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARTINA

Probeta # 1

Espesor 3.14 mm
Ancho 76.8 mm
Largo 152 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 477.28 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 80 | 477.28 | 238.35 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 150 | 477.28 | 446.91 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 220 | 477.28 | 655.46 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 310 | 477.28 | 923.61 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0104 | 350 | 477.28 | 1042.78 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.016E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 3.02 mm
Ancho 76.7 mm
Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 462.06 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 40 | 462.06 | 123.10 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 60 | 462.06 | 184.65 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 115 | 462.06 | 353.92 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 180 | 462.06 | 553.95 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 250 | 462.06 | 769.38 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.130E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 3.06 mm
Ancho 76.3 mm
Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 468.18 | 0.00 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 140 | 468.18 | 425.22 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 210 | 468.18 | 637.83 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 270 | 468.18 | 820.07 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0092 | 340 | 468.18 | 1032.68 |
| 200 | 34 | 0.17 | 5 | 0.0111 | 390 | 468.18 | 1184.54 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.065E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 4

Espesor 3.27 mm
Ancho 76.8 mm
Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 500.31 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 40 | 500.31 | 113.69 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 80 | 500.31 | 227.38 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 160 | 500.31 | 454.76 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 220 | 500.31 | 625.29 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 280 | 500.31 | 795.83 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 8.731E+04 \text{ psi}$$

Orientacion 15 grados

Probeta # 1

Espesor 3.88 mm
 Ancho 75.7 mm
 Largo 152 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 589.76 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 100 | 589.76 | 241.12 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0053 | 210 | 589.76 | 506.34 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 270 | 589.76 | 651.01 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0086 | 340 | 589.76 | 819.79 |
| 200 | 34 | 0.17 | 5 | 0.0112 | 420 | 589.76 | 1012.68 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.211E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 3.31 mm
 Ancho 76.8 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 506.43 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 60 | 506.43 | 168.47 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 120 | 506.43 | 336.95 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 200 | 506.43 | 561.58 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 320 | 506.43 | 898.52 |
| 200 | 34 | 0.17 | 5 | 0.0111 | 410 | 506.43 | 1151.24 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.067E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 4.24 mm
 Ancho 76.7 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 648.72 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 50 | 648.72 | 109.60 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 140 | 648.72 | 306.88 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 180 | 648.72 | 394.56 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 220 | 648.72 | 482.24 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 270 | 648.72 | 591.84 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 6.666E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 4

Espesor 3.17 mm
 Ancho 77.2 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 485.01 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 80 | 485.01 | 234.55 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0045 | 150 | 485.01 | 439.78 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0058 | 230 | 485.01 | 674.34 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 260 | 485.01 | 762.29 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0078 | 320 | 485.01 | 938.21 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.226E+05 \text{ psi}$$

Orientacion 30 grados

Probeta # 1

Espesor 3.23 mm
 Ancho 76.3 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 494.19 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 100 | 494.19 | 287.74 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 190 | 494.19 | 546.71 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 260 | 494.19 | 748.13 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 330 | 494.19 | 949.55 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 390 | 494.19 | 1122.20 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.432E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 2.64 mm
 Ancho 77 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 403.92 | 0.00 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0032 | 90 | 403.92 | 316.84 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0045 | 130 | 403.92 | 457.66 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0071 | 220 | 403.92 | 774.51 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0104 | 310 | 403.92 | 1091.35 |
| 200 | 38 | 0.19 | 5 | 0.0123 | 360 | 403.92 | 1267.38 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.046E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 3.19 mm
 Ancho 76.9 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 488.07 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 60 | 488.07 | 174.81 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 110 | 488.07 | 320.49 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 160 | 488.07 | 466.16 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 220 | 488.07 | 640.97 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0078 | 300 | 488.07 | 874.05 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.135E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 4

Espesor 3.6 mm
 Ancho 77 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 550.80 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 90 | 550.80 | 232.35 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 140 | 550.80 | 361.44 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 190 | 550.80 | 490.52 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0058 | 220 | 550.80 | 567.97 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 240 | 550.80 | 619.61 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.665E+04 \text{ psi}$$



Orientacion 45 grados

BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARTINA

Probeta # 1

Espesor 3.37 mm
Ancho 76.7 mm
Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 515.61 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 60 | 515.61 | 165.47 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 170 | 515.61 | 468.84 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 230 | 515.61 | 634.32 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 290 | 515.61 | 799.79 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0104 | 330 | 515.61 | 910.11 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 8.772E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 4.59 mm
Ancho 76.3 mm
Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 702.27 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 100 | 702.27 | 202.49 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 160 | 702.27 | 323.98 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 220 | 702.27 | 445.47 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 340 | 702.27 | 688.45 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0092 | 380 | 702.27 | 769.45 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 8.307E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 3.55 mm
Ancho 76.7 mm
Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 543.15 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 60 | 543.15 | 157.08 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 140 | 543.15 | 366.53 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 240 | 543.15 | 628.33 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 320 | 543.15 | 837.78 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 330 | 543.15 | 863.96 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.811E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 4

Espesor 3.96 mm
Ancho 77 mm
Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 605.88 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0019 | 75 | 605.88 | 176.02 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0032 | 125 | 605.88 | 293.37 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 250 | 605.88 | 586.75 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0084 | 335 | 605.88 | 786.24 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0097 | 390 | 605.88 | 915.33 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.373E+04 \text{ psi}$$

Orientacion 60 grados

Probeta # 1

Espesor 3.41 mm
 Ancho 76.8 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 521.73 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 55 | 521.73 | 149.91 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 110 | 521.73 | 299.81 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 140 | 521.73 | 381.58 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 170 | 521.73 | 463.34 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 220 | 521.73 | 599.62 |

 $G_{xy \text{ exp}} = 1.163E+05 \text{ psi}$

Probeta # 2

Espesor 3.8 mm
 Ancho 77 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 581.40 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0019 | 80 | 581.40 | 195.67 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0032 | 110 | 581.40 | 269.04 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0045 | 170 | 581.40 | 415.79 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 250 | 581.40 | 611.46 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0084 | 320 | 581.40 | 782.66 |

 $G_{xy \text{ exp}} = 9.304E+04 \text{ psi}$

Probeta # 3

Espesor 3.94 mm
 Ancho 77.3 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 602.82 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 60 | 602.82 | 141.53 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 100 | 602.82 | 235.89 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 160 | 602.82 | 377.43 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0097 | 250 | 602.82 | 589.73 |
| 200 | 38 | 0.19 | 5 | 0.0123 | 320 | 602.82 | 754.85 |

 $G_{xy \text{ exp}} = 6.165E+04 \text{ psi}$

Orientacion 75 grados

Probeta # 1

Espesor 3.78 mm
 Ancho 76.8 mm
 Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 290.30 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 40 | 290.30 | 195.93 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 140 | 290.30 | 685.76 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0078 | 170 | 290.30 | 832.71 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 210 | 290.30 | 1028.65 |
| 200 | 36 | 0.18 | 5 | 0.0117 | 270 | 290.30 | 1322.54 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 2.835E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 3.58 mm
 Ancho 77.7 mm
 Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 278.17 | 0.00 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0032 | 70 | 278.17 | 357.84 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0045 | 100 | 278.17 | 511.21 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0058 | 130 | 278.17 | 664.57 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0071 | 160 | 278.17 | 817.93 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0090 | 200 | 278.17 | 1022.41 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 2.907E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 3.66 mm
 Ancho 76.7 mm
 Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 280.72 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 30 | 280.72 | 151.97 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 70 | 280.72 | 354.59 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 100 | 280.72 | 506.55 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 135 | 280.72 | 683.84 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 150 | 280.72 | 759.83 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 2.909E+04 \text{ psi}$$



Orientación 90 grados

 BIBLIOTECA
 IAC, IAG,
 MARTINA

Probeta # 1

 Espesor 3.21 mm
 Ancho 77 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans.} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|--|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 247.17 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 80 | 247.17 | 460.25 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0058 | 200 | 247.17 | 1150.63 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0071 | 250 | 247.17 | 1438.28 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 330 | 247.17 | 1898.53 |
| 200 | 34 | 0.17 | 5 | 0.0110 | 390 | 247.17 | 2243.72 |

G_{xy exp} = 5.227E+04 psi

Probeta # 2

 Espesor 3.73 mm
 Ancho 76.8 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans.} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|--|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 286.46 | 0.00 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 125 | 286.46 | 620.50 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 190 | 286.46 | 943.16 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0078 | 250 | 286.46 | 1240.99 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0091 | 310 | 286.46 | 1538.83 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0104 | 360 | 286.46 | 1787.03 |

G_{xy exp} = 4.331E+04 psi

Probeta # 3

 Espesor 3.36 mm
 Ancho 76.7 mm
 Largo 154 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans.} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|--|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 257.71 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 70 | 257.71 | 386.25 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 160 | 257.71 | 882.85 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 240 | 257.71 | 1324.27 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 290 | 257.71 | 1600.16 |
| 200 | 36 | 0.18 | 5 | 0.0117 | 390 | 257.71 | 2151.94 |

G_{xy exp} = 4.702E+04 psi

Probeta # 4

 Espesor 2.98 mm
 Ancho 76.2 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | V _{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans.} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|--|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 227.08 | 0.00 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 90 | 227.08 | 563.60 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 180 | 227.08 | 1127.20 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 240 | 227.08 | 1502.93 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0098 | 280 | 227.08 | 1753.42 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0105 | 300 | 227.08 | 1878.67 |

G_{xy exp} = 4.549E+04 psi

CALCULO DEL MODULO DE CORTE PROMEDIO PARA EL COMPUESTO: CABUYA + RESINA

Gxy experimental (psi)

| Probeta # | 0 grados | 15 grados | 30 grados | 45 grados | 60 grados | 75 grados | 90 grados |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1.016E+05 | 9.211E+04 | 1.432E+05 | | 1.163E+05 | 2.835E+04 | 5.227E+04 |
| 2 | 9.130E+04 | 1.067E+05 | 1.046E+05 | | 9.304E+04 | 2.907E+04 | 4.331E+04 |
| 3 | 1.065E+05 | | 1.135E+05 | 9.811E+04 | | 2.909E+04 | 4.702E+04 |
| 4 | | 1.226E+05 | | 9.373E+04 | | | 4.549E+04 |
| PROM = | 9.981E+04 | 1.072E+05 | 1.204E+05 | 9.592E+04 | 1.047E+05 | 2.884E+04 | 4.702E+04 |



PRUEBA DE TENSION HILOS DE CAÑA GUADUA

BIBLIOTECA
IAC, INC.
MARILLANA

Probeta # 1

Long. efectiva 30 mm
Ancho promedio 0.365 mm
Espesor prom. 0.102 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.0372 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.020 | 30 | 0.0372 | 0.0007 | 3820 |
| 0.20 | 0.055 | 30 | 0.0372 | 0.0018 | 7639 |
| 0.30 | 0.090 | 30 | 0.0372 | 0.0030 | 11459 |
| 0.40 | 0.130 | 30 | 0.0372 | 0.0043 | 15278 |
| 1.10 | 0.350 | 30 | 0.0372 | 0.0117 | 42015 |
| Eexp= 3.43E+06 psi | | | | | σ_{rotura} |

Probeta # 2

Long. efectiva 30 mm
Ancho promedio 0.352 mm
Espesor prom. 0.236 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.0831 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.050 | 30 | 0.0831 | 0.0017 | 1712 |
| 0.20 | 0.110 | 30 | 0.0831 | 0.0037 | 3424 |
| 0.30 | 0.155 | 30 | 0.0831 | 0.0052 | 5135 |
| 0.40 | 0.200 | 30 | 0.0831 | 0.0067 | 6847 |
| 0.85 | 0.410 | 30 | 0.0831 | 0.0137 | 14550 |
| Eexp= 1.01E+06 psi | | | | | σ_{rotura} |

Probeta # 3

Long. efectiva 30 mm
Ancho promedio 0.356 mm
Espesor prom. 0.174 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.0619 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.040 | 30 | 0.0619 | 0.0013 | 2296 |
| 0.20 | 0.130 | 30 | 0.0619 | 0.0043 | 4591 |
| 0.30 | 0.185 | 30 | 0.0619 | 0.0062 | 6887 |
| 0.40 | 0.245 | 30 | 0.0619 | 0.0082 | 9182 |
| 1.45 | 0.620 | 30 | 0.0619 | 0.0207 | 33287 |
| Eexp= 1.07E+06 psi | | | | | σ_{rotura} |

Probeta # 4

Long. efectiva 30 mm
 Ancho promedio 0.402 mm
 Espesor prom. 0.259 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.1040 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.030 | 30 | 0.1040 | 0.0010 | 1367 |
| 0.20 | 0.060 | 30 | 0.1040 | 0.0020 | 2734 |
| 0.30 | 0.100 | 30 | 0.1040 | 0.0033 | 4100 |
| 0.40 | 0.130 | 30 | 0.1040 | 0.0043 | 5467 |
| Eexp= 1.24E+06 psi | | | | | |

Probeta # 5

Long. efectiva 30 mm
 Ancho promedio 0.427 mm
 Espesor prom. 0.344 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.1468 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.035 | 30 | 0.1468 | 0.0012 | 969 |
| 0.20 | 0.070 | 30 | 0.1468 | 0.0023 | 1938 |
| 0.30 | 0.110 | 30 | 0.1468 | 0.0037 | 2906 |
| 0.40 | 0.140 | 30 | 0.1468 | 0.0047 | 3875 |
| Eexp= 8.18E+05 psi | | | | | |

Probeta # 6

Long. efectiva 30 mm
 Ancho promedio 0.367 mm
 Espesor prom. 0.152 mm

| P Kg | δ | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.0557 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.110 | 30 | 0.0557 | 0.0037 | 2551 |
| 0.20 | 0.190 | 30 | 0.0557 | 0.0063 | 5102 |
| 0.30 | 0.240 | 30 | 0.0557 | 0.0080 | 7654 |
| 0.40 | 0.310 | 30 | 0.0557 | 0.0103 | 10205 |
| Eexp= 1.00E+06 psi | | | | | |

Probeta # 7

Long. efectiva 30 mm

Ancho promedio 0.395 mm

Espesor prom. 0.199 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.0786 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.070 | 30 | 0.0786 | 0.0023 | 1809 |
| 0.20 | 0.140 | 30 | 0.0786 | 0.0047 | 3618 |
| 0.30 | 0.210 | 30 | 0.0786 | 0.0070 | 5427 |
| 0.40 | 0.260 | 30 | 0.0786 | 0.0087 | 7236 |
| Eexp= | | | 8.19E+05 | psi | |

Probeta # 8

Long. efectiva 30 mm

Ancho promedio 0.406 mm

Espesor prom. 0.216 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.0877 | 0 | 0 |
| 0.10 | 0.100 | 30 | 0.0877 | 0.0033 | 1622 |
| 0.20 | 0.200 | 30 | 0.0877 | 0.0067 | 3243 |
| 0.30 | 0.300 | 30 | 0.0877 | 0.0100 | 4865 |
| 0.40 | 0.370 | 30 | 0.0877 | 0.0123 | 6486 |
| Eexp= | | | 5.15E+05 | psi | |

**MODULO DE YOUNG Y ESFUERZO DE ROTURA PROMEDIO
HILOS DE CAÑA**

| Probeta # | E (psi) | σ_{rotura} (psi) |
|------------|-----------|-------------------------|
| 1 | 3.431E+06 | 42015 |
| 2 | 1.014E+06 | 14550 |
| 3 | 1.073E+06 | 33287 |
| 4 | 1.239E+06 | |
| 5 | 8.175E+05 | |
| 6 | 1.000E+06 | |
| 7 | 8.193E+05 | |
| 8 | 5.154E+05 | |
| promedio = | 1.239E+06 | 29950 |

DIMENSIONES PROMEDIOS DE LOS HILOS DE CAÑA

ANCHO (mm)

| fibra 1 | fibra 2 | fibra 3 | fibra 4 | fibra 5 | fibra 6 | fibra 7 | fibra 8 | fibra 9 | fibra 10 | fibra 11 | fibra 12 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 2.53 | 1.73 | 1.78 | 2.37 | 2.15 | 2.09 | 2.04 | 2.62 | 2.37 | 2.12 | 1.82 | 2.62 |
| 2.43 | 1.49 | 2.04 | 2.43 | 2.32 | 2.02 | 1.97 | 2.48 | 2.24 | 2.25 | 2.06 | 2.39 |
| 2.41 | 1.79 | 2.08 | 2.7 | 2.45 | 1.86 | 1.96 | 2.47 | 2.26 | 2.15 | 1.66 | 2.38 |
| 2.46 | 1.67 | 1.97 | 2.50 | 2.31 | 1.99 | 1.99 | 2.52 | 2.29 | 2.17 | 1.85 | 2.46 |

ESPESOR(mm)

| fibra 1 | fibra 2 | fibra 3 | fibra 4 | fibra 5 | fibra 6 | fibra 7 | fibra 8 | fibra 9 | fibra 10 | fibra 11 | fibra 12 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 2.09 | 1.57 | 1.60 | 1.74 | 1.7 | 1.83 | 1.7 | 1.86 | 1.37 | 1.65 | 1.71 | 1.53 |
| 1.86 | 1.62 | 1.69 | 1.75 | 1.63 | 1.96 | 1.78 | 1.84 | 1.35 | 1.69 | 1.7 | 1.71 |
| 1.7 | 1.49 | 1.81 | 1.74 | 1.62 | 2.02 | 1.94 | 1.94 | 1.5 | 1.67 | 1.79 | 1.63 |
| 1.88 | 1.56 | 1.70 | 1.74 | 1.65 | 1.94 | 1.81 | 1.88 | 1.41 | 1.67 | 1.73 | 1.62 |



BIBLIOTECA
NACIONAL
CUBA
MARTEL

CALCULO DE LA DENSIDAD PROMEDIO DE LA CAÑA GUADUA

| fibra # | masa(gr) | L (mm) | ancho(mm) | espesor(mm) | V (mm ³) | ρ (gr/cm ³) |
|-----------|----------|--------|-----------|-------------|----------------------|------------------------------|
| 1 | 0.3320 | 50 | 2.46 | 1.88 | 231.2 | 1.436 |
| 2 | 0.1468 | 50 | 1.67 | 1.56 | 130.3 | 1.127 |
| 3 | 0.1847 | 50 | 1.97 | 1.7 | 167.5 | 1.103 |
| 4 | 0.3488 | 50 | 2.5 | 1.74 | 217.5 | 1.604 |
| 5 | 0.2831 | 50 | 2.31 | 1.65 | 190.6 | 1.486 |
| 6 | 0.1667 | 50 | 1.99 | 1.94 | 193.0 | 0.864 |
| 7 | 0.3279 | 50 | 1.99 | 1.81 | 180.1 | 1.821 |
| 8 | 0.2972 | 50 | 2.52 | 1.88 | 236.9 | 1.255 |
| 9 | 0.2328 | 50 | 2.29 | 1.41 | 161.4 | 1.442 |
| 10 | 0.3257 | 50 | 2.17 | 1.67 | 181.2 | 1.798 |
| 11 | 0.2239 | 50 | 1.85 | 1.73 | 160.0 | 1.399 |
| 12 | 0.3208 | 50 | 2.46 | 1.62 | 199.3 | 1.610 |
| m total = | 3.1904 | | | | | promedio = 1.412 |

**PRUEBAS DE FLEXIÓN
MATERIAL SANDUCHE : CAÑA GUADUA + Balsa**

0 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.07

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 0 | -9.0E-05 | 0.000 | 0.03 | |
| 2 | 7.0E-05 | -1.3E-04 | 0.538 | 0.09 | |
| 3 | 9.0E-05 | -1.6E-04 | 0.563 | 0.20 | |
| 4 | 1.2E-04 | -1.9E-04 | 0.632 | 0.30 | DESCARGA |
| 0 | 8.0E-05 | -9.0E-05 | 0.889 | 0.17 | |
| 1 | 9.0E-05 | -1.2E-04 | 0.750 | 0.23 | |
| 2 | 1.0E-04 | -1.5E-04 | 0.667 | 0.29 | |
| 3 | 1.1E-04 | -1.7E-04 | 0.647 | 0.30 | |
| m=W / u (lb) | 4.76E+04 | -4.76E+04 | 0.521 | 449.45 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

15 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.11

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 0 | -7.0E-05 | 0 | 0.03 | |
| 2 | 7.00E-05 | -1.5E-04 | 0.467 | 0.10 | |
| 3 | 1.20E-04 | -2.2E-04 | 0.545 | 0.22 | |
| 4 | 1.70E-04 | -2.9E-04 | 0.586 | 0.33 | DESCARGA |
| 0 | 3.00E-05 | -4.0E-05 | 0.750 | 0 | |
| 1 | 6.00E-05 | -9.0E-05 | 0.667 | 0.11 | |
| 2 | 1.00E-04 | -1.6E-04 | 0.625 | 0.24 | |
| 3 | 1.30E-04 | -1.5E-04 | 0.867 | 0.25 | |
| m=W / u (lb) | 4.85E+04 | -3.26E+04 | 0.501 | 601.42 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

30 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.045

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 2.00E-05 | -4.00E-05 | 0.500 | 0.02 | |
| 2 | 4.00E-05 | -9.00E-05 | 0.444 | 0.19 | |
| 3 | 7.00E-05 | -1.40E-04 | 0.500 | 0.51 | |
| 4 | 9.00E-05 | -1.90E-04 | 0.474 | 0.84 | DESCARGA |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.24 | |
| 1 | 3.00E-05 | -6.00E-05 | 0.500 | 0.54 | |
| 2 | 6.00E-05 | -1.10E-04 | 0.545 | 0.76 | |
| 3 | 8.00E-05 | -1.60E-04 | 0.500 | 0.84 | |
| m=W / u (lb) | 8.98E+04 | -4.46E+04 | 0.385 | 175.84 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

45 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.045

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 4.00E-05 | -7.00E-05 | 0.571 | 0.28 | |
| 2 | 6.00E-05 | -1.60E-04 | 0.375 | 0.60 | |
| 3 | 1.00E-04 | -2.50E-04 | 0.400 | 0.91 | |
| 4 | 1.20E-04 | -3.20E-04 | 0.375 | 1.19 | DESCARGA |
| 0 | 0 | -2.00E-05 | 0 | 0.29 | |
| 1 | 2.00E-05 | -1.00E-04 | 0 | 0.66 | |
| 2 | 7.00E-05 | -1.90E-04 | 0.368 | 0.92 | |
| 3 | 1.00E-04 | -2.60E-04 | 0.385 | 1.13 | |
| m=W / u (lb) | 6.80E+04 | -2.72E+04 | 0.275 | 175.02 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

60 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.045

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 2.00E-05 | -7.00E-05 | 0.286 | 0.49 | |
| 2 | 5.00E-05 | -1.70E-04 | 0.294 | 1.03 | |
| 3 | 9.00E-05 | -2.80E-04 | 0.321 | 1.63 | |
| 4 | 1.30E-04 | -3.70E-04 | 0.351 | 2.24 | DESCARGA |
| 0 | 0.00E+00 | -4.00E-05 | 0.000 | 0.31 | |
| 1 | 5.00E-05 | -1.30E-04 | 0.385 | 0.98 | |
| 2 | 9.00E-05 | -2.40E-04 | 0.375 | 1.57 | |
| 3 | 1.10E-04 | -3.30E-04 | 0.333 | 2.02 | |
| m=W / u (lb) | 6.18E+04 | -2.27E+04 | 0.261 | 95.89 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

75 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.045

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 1.00E-05 | -5.00E-05 | 0.200 | 0.65 | |
| 2 | 3.00E-05 | -1.00E-04 | 0.300 | 1.78 | |
| 3 | 6.00E-05 | -2.00E-04 | 0.300 | 3.04 | |
| 4 | 8.00E-05 | -3.00E-04 | 0.267 | 4.85 | DESCARGA |
| 0 | 1.00E-05 | -4.00E-05 | 0.250 | 1.80 | |
| 1 | 3.00E-05 | -1.00E-04 | 0.300 | 3.54 | |
| 2 | 5.00E-05 | -2.00E-04 | 0.250 | 4.16 | |
| 3 | 7.00E-05 | -3.00E-04 | 0.233 | 4.73 | |
| m=W / u (lb) | 1.03E+05 | -2.57E+04 | 0.233 | 34.13 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

90 grados
canal 2 canal 3 polsson reloj G.F=2.045

| W (kg) | $\epsilon_{y=transv}$ | $\epsilon_{x=long}$ | $\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x$ | ω (mm) | |
|--------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CARGA |
| 1 | 2.00E-05 | -6.00E-05 | 0.333 | 0.48 | |
| 2 | 6.00E-05 | -1.50E-04 | 0.400 | 1.34 | |
| 3 | 9.00E-05 | -3.20E-04 | 0.281 | 2.38 | |
| 4 | 1.20E-04 | -5.20E-04 | 0.231 | 3.42 | DESCARGA |
| 0 | 0.00E+00 | -1.10E-04 | 0.000 | 0.00 | |
| 1 | 7.00E-05 | -2.56E-04 | 0.273 | 1.15 | |
| 2 | 1.00E-04 | -3.70E-04 | 0.270 | 2.05 | |
| 3 | 1.20E-04 | -4.60E-04 | 0.261 | 2.43 | |
| m=W / u (lb) | 5.85E+04 | -1.49E+04 | 0.228 | 64.20 | |
| | | | | m(lb/pulg) | |

**CALCULO EXPERIMENTAL DEL MODULO DE ELASTICIDAD
PRUEBAS DE FLEXION - MATERIAL SANDUCHE : CAÑA + Balsa**

Orientación $\theta = 0$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 449.45 | 47584.5 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.91 | 0.91 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.06 | 1.06 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.26 | 0.26 |
| Core thickness | c (plg) | 0.54 | 0.54 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 3.17E+05 | 6.33E+05 |

Orientación $\theta = 15$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 601.42 | 32604.42 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.10 | 1.10 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.26 | 0.26 |
| Core thickness | c (plg) | 0.58 | 0.58 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 3.59E+05 | 3.81E+05 |

Orientación $\theta = 30$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 175.84 | 44598.45 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 1.02 | 1.02 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.10 | 1.10 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.22 | 0.22 |
| Core thickness | c (plg) | 0.66 | 0.66 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 1.10E+05 | 5.44E+05 |

Orientación $\theta = 45$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 175.02 | 27180.28 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.10 | 1.10 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.26 | 0.26 |
| Core thickness | c (plg) | 0.58 | 0.58 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 1.04E+05 | 3.16E+05 |



BIBLIOTECA
IAC, INC.
MADRID

Orientación $\theta=60$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 95.89 | 22737.96 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.02 | 1.02 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.24 | 0.24 |
| Core thickness | c (plg) | 0.54 | 0.54 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 7.19E+04 | 3.09E+05 |

Orientación $\theta=75$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 34.13 | 25710.18 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 1.02 | 1.02 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.02 | 1.02 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.20 | 0.20 |
| Core thickness | c (plg) | 0.62 | 0.62 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 2.70E+04 | 3.69E+05 |

Orientación $\theta=90$ grados

| Constants | Units | Ex (w) | Ex (ϵ_x) |
|--------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 64.20 | 14862.95 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 0.98 | 0.98 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.20 | 0.20 |
| Core thickness | c (plg) | 0.58 | 0.58 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 5.83E+04 | 2.35E+05 |

Calculo densidad de la fibra
 Probetas de hilo de Yute

| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 | Promedio |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| $\phi_{\text{típico}}$ (mm) | 0.056 | 0.056 | 0.056 | 0.056 |
| L (mm) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| P (gr) | 0.0281 | 0.0389 | 0.0392 | |
| No Fibras | 96 | 149 | 157 | |
| Vol (mm ³) | 236.448829 | 366.988287 | 386.692357 | |
| ρ (gr/mm ³) | 1.188E-04 | 1.060E-04 | 1.014E-04 | 1.087E-04 |

Cálculo de V_f (HILOS DE YUTE)

| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 | Probeta No 4 | Probeta No 5 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Area=LxB | 4830.2211 | 4851.1221 | 4865.0561 | 4865.0561 | 4807.23 |
| Largo | 69.33 | 69.67 | 69.67 | 69.67 | 69.67 |
| Ancho | 69.67 | 69.63 | 69.83 | 69.83 | 69 |
| Espesor | 3.874 | 2.728 | 2.04 | 2.07 | 2.974 |
| Densidad de la fibra | 1.087E-04 | 1.087E-04 | 1.087E-04 | 1.087E-04 | 1.087E-04 |
| Peso por unidad de area | 2.59E-04 | 2.59E-04 | 2.59E-04 | 2.59E-04 | 2.59E-04 |
| Peso de la fibra | 1.252 | 1.257 | 1.261 | 1.261 | 1.246 |
| Razón de las fibras en dirección 1 y 2 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 |
| Peso de la fibra dirección 1 | 0.626 | 0.628 | 0.630 | 0.630 | 0.623 |
| Peso de la fibra dirección 2 | 0.626 | 0.628 | 0.630 | 0.630 | 0.623 |
| Area de la fibra en la sección 1 | 83.008 | 82.960 | 83.198 | 83.198 | 82.209 |
| Area de la fibra en la sección 2 | 82.603 | 83.008 | 83.008 | 83.008 | 83.008 |
| Razón de volúmen en dirección 1 | 0.308 | 0.437 | 0.584 | 0.576 | 0.401 |
| Razón de volúmen en dirección 2 | 0.308 | 0.437 | 0.584 | 0.576 | 0.401 |
| Razón de volúmen en matriz 1 | 0.692 | 0.563 | 0.416 | 0.424 | 0.599 |
| Razón de volúmen en matriz 2 | 0.692 | 0.563 | 0.416 | 0.424 | 0.599 |

Calculo del E1 y E2

| | | | | | |
|------------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| Modulo de Young de la matriz | E_m | 3.42E+05 | 3.42E+05 | 3.42E+05 | 3.42E+05 |
| Modulo de Young de la fibra | E_f | 9.30E+05 | 8.10E+05 | 6.80E+05 | 6.90E+05 |
| Modulo de Young direccion 1 | E_1 (psi) | 9.48E+05 | 1.00E+06 | 1.02E+06 | 9.10E+05 |
| Modulo de Young direccion 2 | E_2 (psi) | 9.48E+05 | 1.00E+06 | 1.02E+06 | 9.10E+05 |



BIBLIOTECA
IAC. ING.
MARITIMA

Probetas de tela de YUTE

| | Probeta No 1 | Probeta No 2 | Probeta No 3 | Probeta No 4 | Promedio |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| Peso de la tela, P_T (gr) | 2.6652 | 2.649 | 2.5424 | 2.43 | 2.5717 |
| Peso de las fibras en la dirección 1 (Hilos Gruesos) P_1 (gr) | 1.3326 | 1.3245 | 1.2712 | 1.215 | 1.2858 |
| Peso de las fibras en la dirección 2 (Hilos Finos) P_2 (gr) | 1.3326 | 1.3245 | 1.2712 | 1.215 | 1.2858 |
| Area A (mm ²) | 1.E+04 | 1.E+04 | 1.E+04 | 1.E+04 | 9.9E+03 |
| Peso por unidad de area M_f (gr/mm ²) | 2.67E-04 | 2.65E-04 | 2.54E-04 | 2.51E-04 | 2.59E-04 |
| Razón de las fibras en dirección 1 y 2 r | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.5000 |



BIBLIOTECA
140. 100
MATEMATICA

Probeta # 4

Longitud 30 mm
mecha 67 hilos
Diámetro 1 hilo 5.6E-02 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------------------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.162 | 0 | 0 |
| 0.250 | 0.120 | 30 | 0.162 | 4.0E-03 | 2193 |
| 0.350 | 0.150 | 30 | 0.162 | 5.0E-03 | 3071 |
| 0.450 | 0.180 | 30 | 0.162 | 6.0E-03 | 3948 |
| 0.550 | 0.210 | 30 | 0.162 | 7.0E-03 | 4825 |
| 0.600 | 0.230 | 30 | 0.162 | 7.7E-03 | 5264 |
| 0.650 | 0.250 | 30 | 0.162 | 8.3E-03 | 5702 |
| 1.5 | | | 0.137 | | 15569 |
| E _{exp} = 5.00E+05 psi | | | | | σ_{rotura} |

Probeta # 5

Longitud 30 mm
mecha 64 hilos
Diámetro 1 hilo 5.5E-02 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|---------------------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.162 | 0.0E+00 | 0 |
| 0.100 | 0.040 | 30 | 0.162 | 1.3E-03 | 879 |
| 0.200 | 0.080 | 30 | 0.162 | 2.7E-03 | 1757 |
| 0.300 | 0.120 | 30 | 0.162 | 4.0E-03 | 2636 |
| 0.350 | 0.140 | 30 | 0.162 | 4.7E-03 | 3076 |
| 0.400 | 0.160 | 30 | 0.162 | 5.3E-03 | 3515 |
| 0.450 | 0.185 | 30 | 0.162 | 6.2E-03 | 3954 |
| 1.1 | | | 0.137 | | 11418 |
| E _{exp} = 6.90E+05 psi | | | | | σ_{rotura} |

**MODULO DE YOUNG Y ESFUERZO DE ROTURA PROMEDIO
HILOS DE YUTE**

| Probeta # | E (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|------------|-----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 9.30E+05 | 1.29E+04 | 1.387E-02 |
| 2 | 8.10E+05 | 1.24E+04 | 1.535E-02 |
| 3 | 6.80E+05 | 3.52E+03 | 5.169E-03 |
| 4 | 5.00E+05 | 1.32E+04 | 2.632E-02 |
| 5 | 6.90E+05 | 1.01E+04 | 1.469E-02 |
| promedio = | 7.220E+05 | 1.043E+04 | 1.445E-02 |

PRUEBA DE TENSION HILOS DE YUTE

Probeta # 1

Longitud 30 mm
mecha 62 hilos
Diámetro 1 hilo 5.7E-02 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.160 | 0 | 0 |
| 0.100 | 0.030 | 30 | 0.160 | 1.00E-03 | 889 |
| 0.200 | 0.060 | 30 | 0.160 | 2.00E-03 | 1779 |
| 0.300 | 0.100 | 30 | 0.160 | 3.33E-03 | 2668 |
| 0.350 | 0.125 | 30 | 0.160 | 4.17E-03 | 3113 |
| 0.400 | 0.145 | 30 | 0.160 | 4.83E-03 | 3558 |
| 0.450 | 0.165 | 30 | 0.160 | 5.50E-03 | 4002 |
| 1.45 | | | 0.160 | | 12897 |
| Eexp= 9.30E+05 psi | | | | | σ_{rotura} |

Probeta # 2

Longitud 30 mm
mecha 63 hilos
Diámetro 1 hilo 5.3E-02 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.137 | 0 | 0 |
| 0.250 | 0.100 | 30 | 0.137 | 3.3E-03 | 2591 |
| 0.350 | 0.135 | 30 | 0.137 | 4.5E-03 | 3627 |
| 0.450 | 0.170 | 30 | 0.137 | 5.7E-03 | 4664 |
| 0.500 | 0.185 | 30 | 0.137 | 6.2E-03 | 5182 |
| 0.550 | 0.210 | 30 | 0.137 | 7.0E-03 | 5700 |
| 0.600 | 0.230 | 30 | 0.137 | 7.7E-03 | 6218 |
| 1.2 | | | 0.137 | | 12455 |
| Eexp= 8.10E+05 psi | | | | | σ_{rotura} |

Probeta # 3

Longitud 30 mm
mecha 72 hilos
Diámetro 1 hilo 5.7E-02 mm

| P Kg | δ mm | L_o mm | A_{Trans} mm ² | ϵ | σ lbs/plg ² |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 30 | 0.182 | 0 | 0 |
| 0.050 | 0.025 | 30 | 0.182 | 8.3E-04 | 391 |
| 0.100 | 0.035 | 30 | 0.182 | 1.2E-03 | 781 |
| 0.150 | 0.050 | 30 | 0.182 | 1.7E-03 | 1172 |
| 0.250 | 0.090 | 30 | 0.182 | 3.0E-03 | 1953 |
| 0.350 | 0.150 | 30 | 0.182 | 5.0E-03 | 2734 |
| 0.450 | 0.170 | 30 | 0.182 | 5.7E-03 | 3515 |
| 1.45 | | | 0.137 | | 15050 |
| Eexp= 6.80E+05 psi | | | | | σ_{rotura} |

**CALCULO EXPERIMENTAL DEL MODULO DE ELASTICIDAD
PRUEBAS DE FLEXION - MATERIAL SANDUCHE : YUTE + Balsa**

| Constants | | Orientacion $\theta = 0$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------------------|----------|----------|------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 415.24 | 376.63 | 389.88 | 30683.7 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 1.00 | 0.98 | 0.98 | 1.00 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.16 | 1.18 | 1.18 | 1.16 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.07 | 0.09 | 0.09 | 0.07 |
| Core thickness | c (plg) | 1.01 | 1.00 | 1.00 | 1.01 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 5.19E+05 | 4.00E+05 | 4.14E+05 | 7.9E+05 |

| Constants | | Orientacion $\theta = 15$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|----------------------------------|----------|----------|----------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-3 ** |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 334.25 | 319.58 | 306.88 | 18975.86 |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 1.00 | 0.98 | 0.94 | 0.94 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.11 | 1.10 | 1.14 | 1.14 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Core thickness | c (plg) | 1.01 | 0.99 | 1.02 | 1.02 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 6.65E+05 | 5.94E+05 | 5.04E+05 | 6.3E+05 |

| Constants | | Orientacion $\theta = 30$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|----------------------------------|----------|----------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 ** |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 374.65 | 309.42 | 303.61 | 21535.07 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 1.00 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.14 | 1.13 | 1.11 | 1.14 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| Core thickness | c (plg) | 1.00 | 1.01 | 0.99 | 1.00 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 5.22E+05 | 4.85E+05 | 5.23E+05 | 6.1E+05 |

| Constants | | Orientacion $\theta = 45$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|----------------------------------|----------|----------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 ** |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 291.85 | 314.73 | 303.79 | 22550.75 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.06 |
| Core thickness | c (plg) | 1.02 | 1.02 | 1.00 | 1.02 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 4.47E+05 | 5.16E+05 | 4.32E+05 | 7.0E+05 |



BIBLIOTECA
142.180.
10/01/1988

| Constants | | Orientacion $\theta=60$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------------|----------|----------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-2 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 461.29 | 324.74 | 278.47 | 17276.76 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.96 | 1.02 | 0.95 | 1.02 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.13 | 1.14 | 1.13 | 1.14 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| Core thickness | c (plg) | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 1.00 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 7.43E+05 | 4.42E+05 | 3.85E+05 | 4.8E+05 |

| Constants | | Orientacion $\theta=75$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------------|----------|----------|-------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 298.07 | 313.37 | 397.96 | 21420.83 ** |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | 15.75 | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.96 | 0.98 | 0.98 | 0.96 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| Core thickness | c (plg) | 0.99 | 1.02 | 1.02 | 0.99 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 4.01E+05 | 4.94E+05 | 6.46E+05 | 5.9E+05 |

| Constants | | Orientacion $\theta=90$ grados | | | |
|--------------------------------------|------------|--------------------------------|----------|--------|------------|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-1 |
| Slope of the load - deflection curve | m (lb/plg) | 355.71 | 299.39 | | 20267.56 * |
| Support span | L (plg) | 15.75 | 15.75 | | 15.75 |
| Sandwich width | b (plg) | 0.94 | 0.98 | dañada | 0.94 |
| Sandwich thickness | h (plg) | 1.13 | 1.13 | | 1.13 |
| Facing thickness | f (plg) | 0.07 | 0.06 | | 0.07 |
| Core thickness | c (plg) | 1.00 | 1.01 | | 1.00 |
| Modulus of elasticity in bending | E (psi) | 5.32E+05 | 4.79E+05 | | 6.1E+05 |

CALCULO EXPERIMENTAL DEL MODULO DE CORTE: YUTE + RESINA

Orientacion 0 grados

Probeta # 1

Espesor 3.112 mm
 Ancho 76.33 mm
 Largo 153 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 476.14 | 0.00 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 120 | 476.14 | 358.38 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 170 | 476.14 | 507.71 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 220 | 476.14 | 657.04 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 270 | 476.14 | 806.37 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0092 | 320 | 476.14 | 955.69 |

G_{xy} exp = 1.047E+05 psi

Probeta # 2

Espesor 3.108 mm
 Ancho 76.5 mm
 Largo 152.3 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 473.35 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 50 | 473.35 | 150.21 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 110 | 473.35 | 330.45 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 170 | 473.35 | 510.70 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 210 | 473.35 | 630.87 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 275 | 473.35 | 826.14 |

G_{xy} exp = 1.414E+05 psi

Probeta # 3

Espesor 2.512 mm
 Ancho 76.83 mm
 Largo 152.3 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 382.58 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 55 | 382.58 | 204.43 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 120 | 382.58 | 446.03 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0052 | 150 | 382.58 | 557.53 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 180 | 382.58 | 669.04 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 215 | 382.58 | 799.13 |

G_{xy} exp = 9.644E+04 psi

Probeta # 4

Espesor 2.453 mm
 Ancho 76.83 mm
 Largo 152.7 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ _{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ _{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------|---|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 374.57 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 30 | 374.57 | 113.89 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 60 | 374.57 | 227.78 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 90 | 374.57 | 341.67 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 140 | 374.57 | 531.49 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 160 | 374.57 | 607.41 |

G_{xy} exp = 9.263E+04 psi



Orientacion 16 grados

Probeta # 1

Espesor 2.925 mm
Ancho 76.17 mm
Largo 152.3 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 445.48 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 50 | 445.48 | 159.60 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0053 | 150 | 445.48 | 478.81 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 210 | 445.48 | 670.34 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 240 | 445.48 | 766.10 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 270 | 445.48 | 861.86 |

G_{xy exp} = 1.089E+05 psi

Probeta # 2

Espesor 3.135 mm
Ancho 77 mm
Largo 152.3 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 477.46 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 70 | 477.46 | 208.48 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0045 | 130 | 477.46 | 387.17 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0058 | 170 | 477.46 | 506.30 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0078 | 240 | 477.46 | 714.78 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0097 | 310 | 477.46 | 923.26 |

G_{xy exp} = 9.506E+04 psi

Probeta # 3

Espesor 2.925 mm
Ancho 75.83 mm
Largo 152.3 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 445.48 | 0.00 |
| 200 | 2 | 0.01 | 5 | 0.0007 | 20 | 445.48 | 63.84 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 60 | 445.48 | 191.52 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 100 | 445.48 | 319.21 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 150 | 445.48 | 478.81 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 200 | 445.48 | 638.42 |

G_{xy exp} = 1.068E+05 psi

Probeta # 4

Espesor 2.662 mm
Ancho 76.17 mm
Largo 152.2 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 405.16 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 30 | 405.16 | 105.29 |
| 200 | 10 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 80 | 405.16 | 280.78 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 120 | 405.16 | 421.17 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 185 | 405.16 | 649.30 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0092 | 260 | 405.16 | 912.54 |

G_{xy exp} = 1.009E+05 psi

Orientacion 30 grados

Probeta # 1

Espesor 2.318 mm
 Ancho 77 mm
 Largo 152.8 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 354.19 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 17.5 | 354.19 | 70.26 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 52.5 | 354.19 | 210.78 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0058 | 77.5 | 354.19 | 311.15 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0078 | 102.5 | 354.19 | 411.52 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0084 | 112.5 | 354.19 | 451.66 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 5.311E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 3.523 mm
 Ancho 77 mm
 Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 539.02 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0019 | 55 | 539.02 | 145.10 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 115 | 539.02 | 303.38 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0065 | 200 | 539.02 | 527.63 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0084 | 260 | 539.02 | 685.91 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0104 | 320 | 539.02 | 844.20 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 8.202E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 2.707 mm
 Ancho 76 mm
 Largo 152.3 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 412.28 | 0.00 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 60 | 412.28 | 206.95 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 115 | 412.28 | 396.65 |
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 220 | 412.28 | 758.81 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0105 | 320 | 412.28 | 1103.73 |
| 200 | 42 | 0.21 | 5 | 0.0138 | 400 | 412.28 | 1379.66 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.042E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 4

Espesor 2.603 mm
 Ancho 76.33 mm
 Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 398.26 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 50 | 398.26 | 178.53 |
| 200 | 12 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 100 | 398.26 | 357.05 |
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 150 | 398.26 | 535.58 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 200 | 398.26 | 714.11 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0098 | 250 | 398.26 | 892.64 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.085E+04 \text{ psi}$$



Orientacion 45 grados

Probeta # 1

Espesor 2.62 mm
 Ancho 76.33 mm
 Largo 153 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 70 | 400.86 | 248.32 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0105 | 120 | 400.86 | 425.68 |
| 200 | 46 | 0.23 | 5 | 0.0151 | 275 | 400.86 | 975.53 |
| 200 | 50 | 0.25 | 5 | 0.0164 | 345 | 400.86 | 1223.84 |
| 200 | 54 | 0.27 | 5 | 0.0177 | 410 | 400.86 | 1454.42 |
| 200 | 58 | 0.29 | 5 | 0.0190 | 470 | 400.86 | 1667.27 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.353E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 2.473 mm
 Ancho 75.5 mm
 Largo 151.5 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 374.66 | 0.00 |
| 200 | 4 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 40 | 374.66 | 151.82 |
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 90 | 374.66 | 341.59 |
| 200 | 16 | 0.08 | 5 | 0.0053 | 290 | 374.66 | 1100.68 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 340 | 374.66 | 1290.45 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 390 | 374.66 | 1480.22 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 2.016E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 1.635 mm
 Ancho 76 mm
 Largo 151.5 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 247.70 | 0.00 |
| 200 | 6 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 50 | 247.70 | 287.04 |
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 120 | 247.70 | 688.89 |
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 210 | 247.70 | 1205.56 |
| 200 | 32 | 0.16 | 5 | 0.0105 | 280 | 247.70 | 1607.41 |
| 200 | 36 | 0.18 | 5 | 0.0118 | 310 | 247.70 | 1779.63 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.520E+05 \text{ psi}$$

Orientacion 60 grados

Probeta # 1

Espesor 2.357 mm
 Ancho 76.33 mm
 Largo 152 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 22 | 0.11 | 5 | 0.0072 | 60 | 358.26 | 238.15 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0098 | 115 | 358.26 | 456.45 |
| 200 | 40 | 0.20 | 5 | 0.0131 | 215 | 358.26 | 853.37 |
| 200 | 47 | 0.24 | 5 | 0.0154 | 290 | 358.26 | 1151.05 |
| 200 | 52.2 | 0.26 | 5 | 0.0171 | 345 | 358.26 | 1369.35 |
| 200 | 63 | 0.32 | 5 | 0.0206 | 410 | 358.26 | 1627.35 |

G_{xy exp} = 1.089E+05 psi

Probeta # 2

Espesor 2.217 mm
 Ancho 75.83 mm
 Largo 151.1 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 18 | 0.09 | 5 | 0.0059 | 30 | 334.99 | 127.35 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0099 | 85 | 334.99 | 360.82 |
| 200 | 34 | 0.17 | 5 | 0.0112 | 120 | 334.99 | 509.39 |
| 200 | 38 | 0.19 | 5 | 0.0125 | 155 | 334.99 | 657.96 |
| 200 | 40 | 0.20 | 5 | 0.0132 | 175 | 334.99 | 742.86 |
| 200 | 43 | 0.22 | 5 | 0.0142 | 199 | 334.99 | 844.74 |

G_{xy exp} = 8.805E+04 psi

Probeta # 3

Espesor 2.727 mm
 Ancho 75.67 mm
 Largo 153.5 mm

| V _{papel} mm/min | D _{papel} mm | t _{prueba} min | Vmaq mm/min | γ_{xy} | P Kg | A _{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 14 | 0.07 | 5 | 0.0046 | 90 | 418.59 | 305.74 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 145 | 418.59 | 492.58 |
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0086 | 200 | 418.59 | 679.42 |
| 200 | 48 | 0.24 | 5 | 0.0159 | 275 | 418.59 | 934.20 |
| 200 | 52 | 0.26 | 5 | 0.0172 | 310 | 418.59 | 1053.10 |
| 200 | 64 | 0.32 | 5 | 0.0211 | 497.5 | 418.59 | 1690.05 |

G_{xy exp} = 7.082E+04 psi



Orientacion 75 grados

Probeta # 1

Espesor 2.222 mm
 Ancho 76 mm
 Largo 152 mm

BIBLIOTECA

UNIVERSIDAD DE GUATEMALA
 1958

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 8 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 25 | 337.74 | 105.26 |
| 200 | 20 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 90 | 337.74 | 378.93 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0092 | 150 | 337.74 | 631.54 |
| 200 | 38 | 0.19 | 5 | 0.0125 | 240 | 337.74 | 1010.47 |
| 200 | 44 | 0.22 | 5 | 0.0145 | 295 | 337.74 | 1242.04 |
| 200 | 51.5 | 0.26 | 5 | 0.0169 | 353 | 337.74 | 1486.23 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 9.945E+04 \text{ psi}$$

Probeta # 2

Espesor 2.272 mm
 Ancho 75.83 mm
 Largo 150.8 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 24 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 85 | 342.62 | 352.78 |
| 200 | 28 | 0.14 | 5 | 0.0092 | 115 | 342.62 | 477.30 |
| 200 | 35 | 0.18 | 5 | 0.0115 | 190 | 342.62 | 788.58 |
| 200 | 38 | 0.19 | 5 | 0.0125 | 220 | 342.62 | 913.09 |
| 200 | 44 | 0.22 | 5 | 0.0145 | 280 | 342.62 | 1162.11 |
| 200 | 50 | 0.25 | 5 | 0.0165 | 325 | 342.62 | 1348.88 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.199E+05 \text{ psi}$$

Probeta # 3

Espesor 2.392 mm
 Ancho 76.5 mm
 Largo 153.2 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 200 | 26 | 0.13 | 5 | 0.0085 | 65 | 366.45 | 252.23 |
| 200 | 30 | 0.15 | 5 | 0.0098 | 95 | 366.45 | 368.64 |
| 200 | 34 | 0.17 | 5 | 0.0111 | 130 | 366.45 | 504.46 |
| 200 | 38 | 0.19 | 5 | 0.0124 | 170 | 366.45 | 659.67 |
| 200 | 46 | 0.23 | 5 | 0.0150 | 245 | 366.45 | 950.70 |
| 200 | 53.2 | 0.27 | 5 | 0.0174 | 300 | 366.45 | 1164.13 |

$$G_{xy \text{ exp}} = 1.051E+05 \text{ psi}$$

Orientacion 90 grados

Probeta # 1

Espesor 2.068 mm
 Ancho 75 mm
 Largo 152 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 100 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 314.34 | 0.00 |
| 100 | 1 | 0.01 | 5 | 0.0007 | 10 | 314.34 | 45.24 |
| 100 | 2 | 0.02 | 5 | 0.0013 | 20 | 314.34 | 90.48 |
| 100 | 3 | 0.03 | 5 | 0.0020 | 30 | 314.34 | 135.71 |
| 100 | 4 | 0.04 | 5 | 0.0027 | 40 | 314.34 | 180.95 |
| 100 | 5 | 0.05 | 5 | 0.0033 | 50 | 314.34 | 226.19 |

 $G_{xy \text{ exp}} = 6.786E+04 \text{ psi}$

Probeta # 2

Espesor 1.777 mm
 Ancho 75.83 mm
 Largo 151 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 100 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 268.33 | 0.00 |
| 100 | 4 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 23 | 268.33 | 121.89 |
| 100 | 8 | 0.08 | 5 | 0.0053 | 51 | 268.33 | 270.27 |
| 100 | 10 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 65 | 268.33 | 344.47 |
| 100 | 12 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 81 | 268.33 | 429.26 |
| 100 | 16 | 0.16 | 5 | 0.0105 | 105 | 268.33 | 556.45 |

 $G_{xy \text{ exp}} = 5.382E+04 \text{ psi}$

Probeta # 3

Espesor 2.192 mm
 Ancho 76 mm
 Largo 150.3 mm

| V_{papel} mm/min | D_{papel} mm | t_{prueba} min | V_{maq} mm/min | γ_{xy} | P Kg | A_{Trans} mm ² | τ_{xy} lbs/plg ² |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 100 | 0 | 0.00 | 5 | 0.0000 | 0 | 329.46 | 0.00 |
| 100 | 4 | 0.04 | 5 | 0.0026 | 36 | 329.46 | 155.38 |
| 100 | 6 | 0.06 | 5 | 0.0039 | 62 | 329.46 | 267.60 |
| 100 | 8 | 0.08 | 5 | 0.0053 | 92 | 329.46 | 397.09 |
| 100 | 10 | 0.10 | 5 | 0.0066 | 126 | 329.46 | 543.84 |
| 100 | 12 | 0.12 | 5 | 0.0079 | 156 | 329.46 | 673.32 |

 $G_{xy \text{ exp}} = 8.697E+04 \text{ psi}$

CALCULO DEL MODULO DE CORTE PROMEDIO PARA EL COMPUESTO: YUTE + RESINA

G_{xy} experimental (psi)

| Probeta # | 0 grados | 15 grados | 30 grados | 45 grados | 60 grados | 75 grados | 90 grados |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1.047E+05 | 1.089E+05 | | 1.353E+05 | 1.089E+05 | 9.945E+04 | 6.786E+04 |
| 2 | 1.414E+05 | 9.506E+04 | 8.202E+04 | 2.016E+05 | 8.805E+04 | 1.199E+05 | |
| 3 | 9.644E+04 | 1.068E+05 | 1.042E+05 | 1.520E+05 | | 1.051E+05 | 8.697E+04 |
| 4 | 9.263E+04 | 1.009E+05 | 9.085E+04 | | | | |
| PROM = | 1.088E+05 | 1.029E+05 | 9.237E+04 | 1.630E+05 | 9.849E+04 | 1.082E+05 | 7.742E+04 |

RESUMEN PARA EL ANALISIS DE RESISTENCIA

HILOS DE CAÑA GUADUA

| probeta # | E_x (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|-----------------|-------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 3.43E+06 | 4.20E+04 | 1.225E-02 |
| 2 | 1.01E+06 | 1.95E+04 | 1.932E-02 |
| 3 | 1.07E+06 | 3.33E+04 | 3.111E-02 |
| 4 | 1.24E+06 | 4.10E+04 | 3.307E-02 |
| 5 | 8.20E+05 | | |
| 6 | 1.00E+06 | | |
| 7 | 8.20E+05 | | |
| promedio | 1341428.57 | 33954.5 | 2.531E-02 |



BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE GUATEMALA

HILOS DE CABUYA

| probeta # | E_x (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|-----------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 8.04E+05 | 8.38E+03 | 1.043E-02 |
| 2 | 1.79E+06 | 2.07E+04 | 1.155E-02 |
| 3 | 1.47E+06 | 3.41E+04 | 2.329E-02 |
| 4 | 4.75E+06 | 4.61E+04 | 9.697E-03 |
| 5 | 2.71E+06 | 4.05E+04 | 1.494E-02 |
| promedio | 2304456.6 | 29954.2 | 0.012998379 |

HILOS DE YUTE

| probeta # | E_x (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|-----------------|---------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 9.30E+05 | 1.29E+04 | 1.387E-02 |
| 2 | 8.10E+05 | 1.24E+04 | 1.535E-02 |
| 3 | 6.80E+05 | 3.52E+03 | 5.169E-03 |
| 4 | 5.00E+05 | 1.32E+04 | 2.632E-02 |
| 5 | 6.90E+05 | 1.01E+04 | 1.469E-02 |
| promedio | 722000 | 10429.44 | 0.014445208 |

PROBETA DE RESINA

| probeta # | E_x (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|-----------|-------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 310000 | 2272.927073 | 0.0066406 |
| 3 | 1.39E+05 | 2.94E+03 | 2.116E-02 |
| 4 | 1.20E+05 | 2.70E+03 | 2.250E-02 |

elegido

PROBETAS DE CABUYA+RESINA

| orientación | E_x (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|-------------|-------------|-------------------------|---------------------|
| 0 | 662000 | 1680 | 0.002537764 |
| 15 | 6.13E+05 | 7.20E+02 | 1.175E-03 |
| 30 | 5.09E+05 | 1.19E+03 | 2.338E-03 |
| 45 | 3.37E+05 | 5.00E+02 | 1.484E-03 |
| 60 | 3.64E+05 | 9.70E+02 | 2.665E-03 |
| 75 | 3.01E+05 | 1.24E+03 | 4.120E-03 |
| 90 | 3.71E+05 | 8.20E+02 | 2.210E-03 |

PROBETAS DE YUTE+RESINA

| orientación | E_x (psi) | σ_{rotura} (psi) | ϵ_{rotura} |
|-------------|-------------|-------------------------|---------------------|
| 0 | 793000 | 1010 | 0.001273644 |
| 15 | 6.33E+05 | 8.60E+02 | 1.359E-03 |
| 30 | 6.10E+05 | 6.20E+02 | 1.016E-03 |
| 45 | 7.02E+05 | 8.60E+02 | 1.225E-03 |
| 60 | 4.78E+05 | 2.08E+03 | 4.351E-03 |
| 75 | 5.85E+05 | 8.10E+02 | 1.385E-03 |
| 90 | 6.12E+05 | 1.57E+03 | 2.565E-03 |

PROBETAS DE CAÑA GUADUA+RESINA

| orientación | E_x (psi) |
|-------------|-------------|
| 0 | 633409.6 |
| 15 | 3.81E+05 |
| 30 | 5.44E+05 |
| 45 | 3.16E+05 |
| 60 | 3.09E+05 |
| 75 | 3.69E+05 |
| 90 | 2.35E+05 |



BIBLIOTECA
FAC. ING.
MARITIMA

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM, ASTM STANDARDS AND LITERATURE REFERENCES FOR COMPOSITE MATERIALS, Second Edition, Usa, 1990.
2. Bureau Veritas, RULES AND REGULATIONS FOR THE CLASSIFICATION OF SHIPS, Chapter 11, France, 1996.
3. Gibbs & Cox, Inc., MARINE DESIGN MANUAL FOR FIBERGLASS REINFORCED PLASTICS, Mc Graw-Hill, Usa, 1960.
4. Gibson Ronald F., PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS, McGraw-Hill, Inc, Usa, 1994.
5. Grayson Martin, ENCYCLOPEDIA OF COMPOSITE MATERIAL AND COMPONENTS Jhon Wiley & Sons, Usa, 1983.
6. Popov Egor P., INTRODUCCION A LA MECANICA DE SOLIDOS, Primera Edición, Limusa, México, 1976.

7. Whelan A. And Craft J. L., THE PHISICAL TESTING OF PLASTICS AND RUBBERS, J.J. Lloyd Instrument Ltd., England, 1980.



BIBLIOTECA
FAC. ENG.
MATERIA

•
•
•