

# Análisis de tensión (según norma ICONTEC 595) para el material compuesto resina poliéster-cuerda de cáñamo

## RESUMEN

En el presente artículo se exponen los resultados del estudio, así como las metodologías y procedimientos utilizados, en el análisis de tensión realizado a un material compuesto de matriz polimérica de resina poliéster con cuerdas de cáñamo.

La metodología utilizada consistió en elaborar probetas de fibra, resina y material compuesto con fibra continua, para luego realizar ensayo de tensión a estas probetas; con los resultados obtenidos de la fibra y la resina se determinó la longitud crítica de fibra para realizar las probetas restantes de fibra corta.

**Palabras clave:** material compuesto, refuerzo con fibras naturales, propiedades mecánicas.

## 1. Introducción

Dentro de la industria moderna se ha venido implementando una tendencia hacia el reemplazo de materiales ferrosos y no ferrosos en estructuras y diversas aplicaciones con polímeros o materiales compuestos. Estos últimos presentan las mejores propiedades y capacidades de sustitución de materiales puesto que combinan la tenacidad de una matriz con una resistente fase de refuerzo, además de solucionar los principales defectos de los metales como materiales de estructuras y elementos mecánicos: la oxidación y la resistencia a la corrosión.

En los últimos años se ha incrementado el interés en los refuerzos con fibras naturales, esto debido a que las propiedades mecánicas de estas son comparables

Autor

Francisco Alexander González Alfaro<sup>1</sup>

Director

Henry Moreno Acosta

<sup>1</sup> Tecnólogo mecánico. Integrante del Semillero de Investigación PEMI (Progreso En Materiales de Ingeniería). Ha realizado estudios en diseño con software CAD y moldeo básico de piezas de fibra de vidrio en el SENA. Áreas de interés diseño mecánico, motores de combustión y materiales.

con las fibras sintéticas de uso común, además ofrecen la inmensa ventaja de tener una densidad mucho menor que las fibras sintéticas. En la tabla 1 se comparan las propiedades del cáñamo frente a la fibra de vidrio más común.

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo fractura (MPa)	Modulo E específico (Gpa/densidad)
Vidrio-E	2.6	2000	76
Cáñamo	1.5	813	33.6

Tabla 1. comparativo propiedades mecánicas vidrio-cáñamo (1).

Como se puede observar, las propiedades del cáñamo se pueden comparar frente a la fibra de vidrio, puesto que los valores del esfuerzo de fractura están en un nivel de comparación razonable, teniendo en cuenta el origen de cada fibra.

En la fase inicial del proyecto se procedió a fabricar los moldes para la elaboración de las probetas. En esta etapa se utilizó un molde de silicona y vidrio, el cual permite la fabricación de las probetas sin la presencia de agentes desmoldeantes, pues el molde en su textura es totalmente flexible, además elimina la necesidad de usar pestaña de desmoldeo.

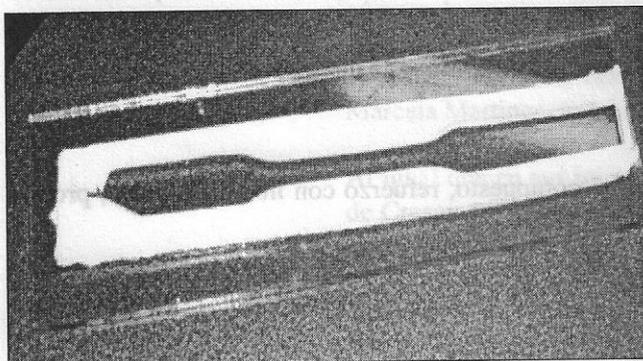


Figura 1. Molde Vidrio-silicona.

Como este proyecto se basa en la norma ICONTEC 595, se hicieron 5 probetas por cada variación en el porcentaje de fibra, así como 10 probetas para evaluar el comportamiento de la cuerda y la resina.

Luego de elaborar las probetas se procedió a realizar el ensayo de tensión en la máquina universal de ensayos del laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad Tecnológica; el método de ensayo fue el automático.

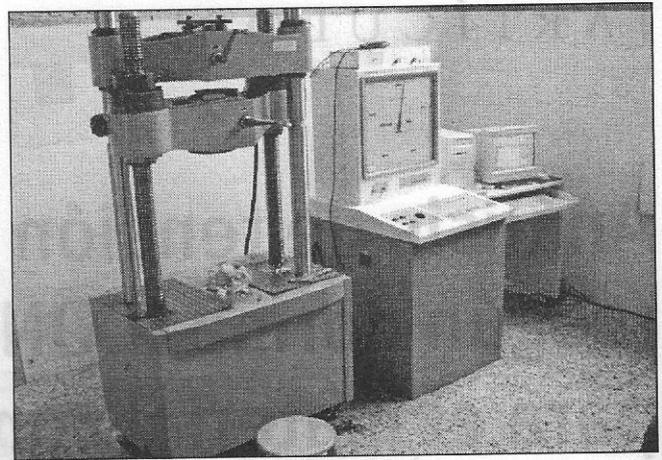


Figura 2. Máquina universal de ensayos de la Facultad Tecnológica.

Con los datos obtenidos de la máquina se realizó una gráfica de esfuerzo-deformación donde se muestra el comportamiento de cada probeta con el mismo porcentaje de cáñamo, luego se promediaron los datos de cada serie de probetas para obtener la gráfica promedio; mediante el cálculo de la desviación estándar se analizó la dispersión de los datos; para las gráficas promedio se ilustra también el coeficiente de determinación.<sup>2</sup>

También se realizaron gráficas de esfuerzo de fractura vs. % de fibra y de módulo de elasticidad vs. % de fibra.

## 2. Desarrollo del proyecto

### 2.1. Consideraciones generales

El desarrollo se hizo usando cáñamo en forma de cuerda, debido a la facilidad con que se consigue, en vez de fibra. Puesto que la medida del diámetro es necesaria para realizar cálculos de propiedades mecánicas, se procedió a su medición, obteniéndose un promedio de 0.79 mm; además de que, al estar torsionada fuertemente y ser suficientemente delgada, permite hacer la aproximación de su sección transversal a la de una circunferencia.

En cuanto a la resina, se consultaron a los principales fabricantes a nivel nacional y de acuerdo a las recomendaciones hechas respecto al tipo de aplicación, se ha escogido

<sup>2</sup> Este valor, conocido como valor R cuadrado es un número de 0 a 1 que revela en qué grado se corresponden los valores estimados con los datos reales. Una línea de tendencia es más confiable cuando su valor R cuadrado es o se acerca a 1.

la resina poliéster Cristalán 809 de la empresa Andercol S.A. Esta es una resina empleada principalmente en la industria de autopartes y carrocerías, porque, debido a su mayor tiempo de gelado y menor temperatura de exothermia, permite hacer varios laminados consecutivos. La resina brinda una proporción adecuada entre propiedades mecánicas y resistencia al agua y a los agentes ambientales. Por recomendación del fabricante, se ha catalizado con MEK peróxido al 2% en peso.

## 2.2. Instrumentos y herramientas

Durante la fabricación de las probetas se usó el laboratorio de metalografía de la Facultad Tecnológica, en el cual se utilizaron herramientas como balanza de precisión, moldes y recipientes.

## 2.3. Cálculos previos a la fabricación de probetas

Para facilitar la elaboración de las probetas de fibra continua, se determinó hacer el refuerzo mediante un número determinado de cuerdas, es decir, primero con 3 cuerdas orientadas paralelamente al eje de la probeta y hacer incrementos de 3 cuerdas hasta llegar a un máximo de 15; para cada probeta se determinaba la masa de las cuerdas para los posteriores cálculos de fracción volumétrica. En el caso del material con fibra corta se siguió el mismo procedimiento, con la variación de que las cuerdas, después de su pesado, eran cortadas en fragmentos de extensión cercana a la longitud crítica y luego se mezclaban con la resina sin catalizar.

Por lo anterior, se hace necesario trabajar con las densidades de los materiales utilizados; en la tabla 2 se muestran sus densidades:

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Resina Cristalán 809	1.2
Cáñamo	1.5
Catalizador MEK	1.15

Tabla 2: Densidad de los materiales.

Teniendo en cuenta el volumen de la probeta, se establecieron las fracciones volumétricas aproximadas para cada número de fibras (tabla 3).

volumen probeta=20,58cm <sup>3</sup>				
numero de fibras	masa promedio (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	volumen total fibra (cm <sup>3</sup> )	fracción vol. aprox (%)
3	0,65	1,5	0,433	2,1
6	1,3	1,5	0,867	4,2
9	1,95	1,5	1,300	6,3
12	2,6	1,5	1,733	8,4
15	3,25	1,5	2,167	10,5

Tabla 3. Fracciones volumétricas aproximadas.

La tabla 4 muestra las cantidades de constituyentes para la elaboración de cada serie de probetas, pues la catalización de la resina se hace por peso (2%) y no por volumen.

densidad resina=1,2g/cm <sup>3</sup>			
fracción vol. aprox (%)	masa fibra (g)	masa resina (g)	masa MEK (g)
2,1	0,65	24,05	0,481
4,2	1,3	23,40	0,468
6,3	1,95	22,75	0,455
8,4	2,6	22,10	0,442
10,5	3,25	21,45	0,429

Tabla 4. Cantidades de constituyentes.

Como en el proceso de moldeado sucede un desperdicio inevitable de material, se ha mantenido constante la masa de resina y catalizador en 25 y 0.5 g respectivamente.

## 2.4. Proceso de moldeado

Luego de hacer los cálculos correspondientes a los constituyentes, se procede a realizar el moldeo. Primero se limpian los moldes, luego se pesan los constituyentes y se mezclan. Para el caso del refuerzo de fibra corta, se mezcla primero la resina junto con los fragmentos de cuerda hasta que desaparezcan las burbujas y luego se incorpora el catalizador, posteriormente se hace el vertimiento del material en el molde y se tapa para que quede homogéneo.

En el caso del refuerzo con fibra continua, primero se mezclan la resina y el catalizador, se vierte una capa de esta mezcla en el molde para luego hacer la impregnación de las fibras manualmente, se vierte la resina restante y se tapa.

Pasada una hora de haber mezclado los componentes se realiza el desmoldeo, para que la probeta ya rígida continúe su curado durante 24 horas más.

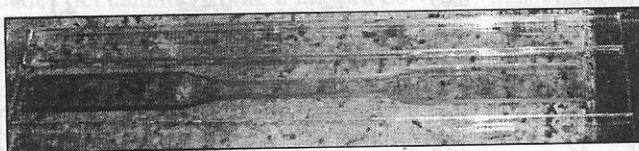


Figura 3. Probeta ya curada, nótase que la parte de silicona del molde ha sido retirada.

### 3. Resultados

#### 3.1. Resultados resina poliéster Cristalán 809

Como los resultados del ensayo de la resina son necesarios para el cálculo de la longitud crítica de la fibra corta y el posterior análisis de los resultados de los ensayos con este tipo de refuerzo, se muestra la gráfica del ensayo con la tabla de datos arrojada por la máquina.

En la tabla de datos, se muestra la resistencia última a la tensión (Sut), el valor del esfuerzo de fractura (Sfract) y el módulo de elasticidad (E), así como los valores máximo, mínimo y promedio de los datos mencionados.

Symbol	Sut	Sfract	E
Dimension	MPa	MPa	MPa
1	46,9759	46,4117	90,7189
2	45,6416	45,2055	95,9581
3	37,6965	37,6965	89,7317
4	50,9499	50,4161	110,914
5	61,6936	61,3823	98,523
media	48,5915	48,22242	97,16914
minimo	37,6965	37,6965	89,7317
maximo	61,6936	61,3823	110,914

Tabla 5. Resultados del ensayo de la resina Cristalán 809.

En la figura 4 se muestra el comportamiento de cada una de las cinco probetas que conforman la serie. Como se puede observar, las probetas tuvieron un comportamiento similar, puesto que las pendientes coinciden en la mayoría de probetas, sin embargo esta simple apreciación visual no es suficiente para establecer la confiabilidad de los datos del ensayo.

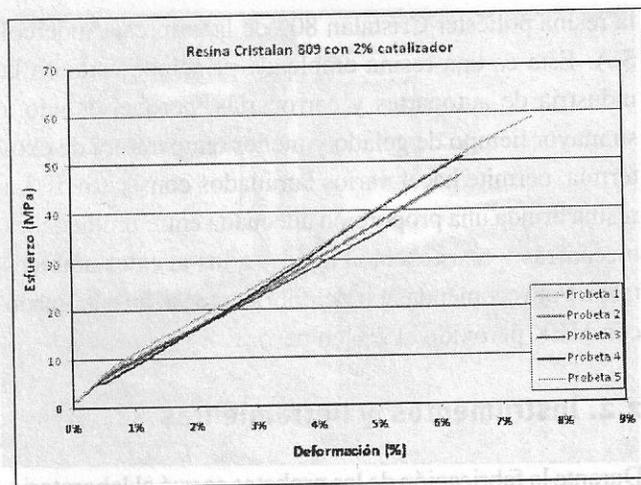


Figura 4. Gráfica esfuerzo-deformación para la resina Cristalán 809.

#### 3.2. Resultados cuerda de cáñamo

Para efectos del análisis de resultados del refuerzo de fibra corta se muestra en la figura 5 la gráfica de las probetas de cuerda de cáñamo, además de la tabla de datos de la cuerda arrojados por la máquina.

Symbol	E	Sut
Dimension	GPa	MPa
1	2401,630	668,225
2	2510,795	420,141
3	982,485	592,199
4	3820,775	568,191
5	982,485	496,167
Mean	2139,634	548,985
maximo	3820,775	668,225
minimo	982,485	420,141

Tabla 6. Resultados del ensayo de la cuerda de cáñamo.

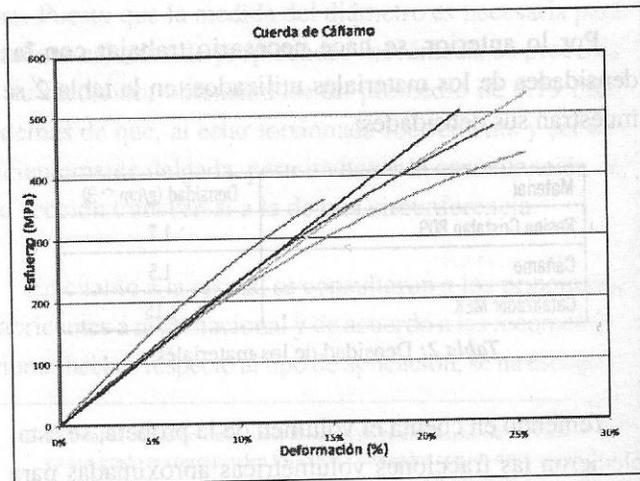


Figura 5. Gráfica esfuerzo-deformación de la cuerda de cáñamo.

### 3.3. Fibra corta

Para visualizar los resultados del ensayo de fibra corta, es necesario mostrar los resultados del cálculo de la longitud crítica de la cuerda de cáñamo.

#### 3.3.1. Cálculo de la longitud crítica de la fibra corta

De acuerdo con los datos anteriores de la resina y la cuerda, se puede calcular la longitud crítica de la cuerda mediante la fórmula de longitud crítica de Schaffer (2):

$$l_c = \frac{\sigma_{fu} * d}{2\tau_{my}}$$

Donde:

$\sigma_{fu}$  : resistencia última a la tensión de la fibra.

$d$  : diámetro de la fibra.

$\tau_{my}$  : resistencia de cedencia cortante de la matriz.

De acuerdo con la teoría de falla por esfuerzo cortante máximo (3),  $\tau_{my}$  se puede aproximar a  $\tau_{my} = 0.5Sut_{resina}$ , por lo que tenemos:

$$l_c = \frac{\sigma_{fu} * d}{2(0.5 Sut_{resina})}$$

$$l_c = \frac{548.98MPa * 0.79mm}{2(0.5 * 48.59MPa)} = 8.92mm$$

En el proceso de fabricación de las probetas, se trabajó con fragmentos de longitud mayor que  $l_c$  (entre 10 y 15mm).

Symbol	Sut	Sfract	E
Dimension	MPa	MPa	MPa
1	35,34	34,26	113,99
2	28,78	27,57	104,61
3	38,10	36,85	102,76
4	37,06	35,79	100,86
5	36,30	35,10	102,12
Mean	35,11	33,91	104,87
maximo	38,10	36,85	113,99
minimo	28,78	27,57	100,86

Tabla 7. Resultados del ensayo del material compuesto con 2.1% de fibra corta.

En la figura 6 se aprecia la gráfica correspondiente al refuerzo con 2.1% de fibra corta.

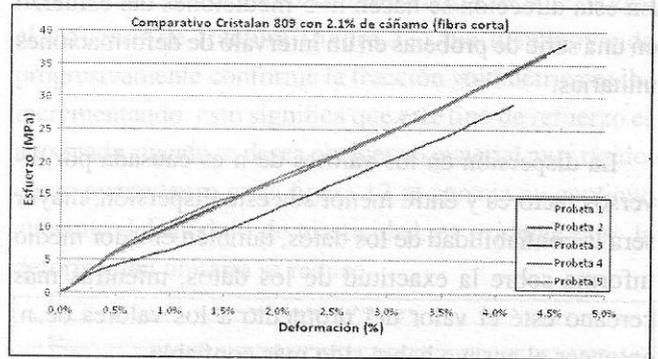


Figura 6. Gráfica esfuerzo-deformación para el refuerzo con 2.1% de fibra corta.

### 3.4. Resultados fibra continua

Para el refuerzo con fibra continua, figura 7, correspondiente a la fracción de fibra que contribuyó en mayor medida al mejoramiento de las propiedades mecánicas.

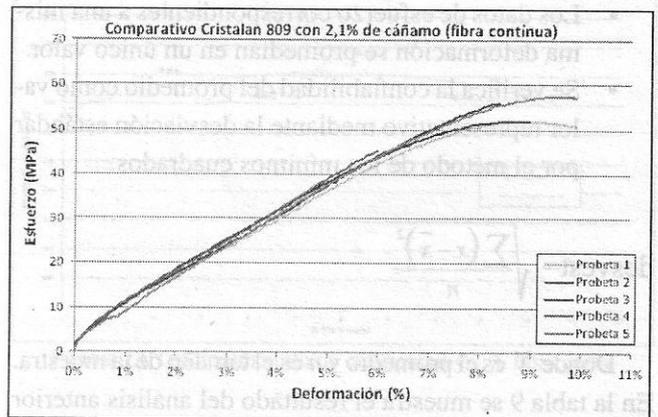


Figura 7. Gráfica esfuerzo-deformación para el refuerzo con 2.1% de fibra continua.

Symbol	Sut	Sfract	E
Dimension	MPa	MPa	MPa
1	51,8364	48,7115	88,2834
2	55,9118	55,6666	92,0474
3	51,8364	51,7905	101,826
4	42,5077	42,0941	89,1118
5	57,2786	57,14	101,033
Mean	51,87418	51,08054	94,46032
maximo	57,2786	57,14	101,826
minimo	42,5077	42,0941	88,2834

Tabla 8. Datos acerca de las propiedades mecánicas arrojados por la máquina de ensayos para el refuerzo con 2.1% de fibra continua.

### 3.5. Confiabilidad de los datos

En esta dirección se hacen  $n=5$  mediciones del esfuerzo en una serie de probetas en un intervalo de deformaciones unitarias.

La dispersión en los valores de  $n$  es causada por diversos factores y entre menor sea esta dispersión, mayor será la confiabilidad de los datos, también el valor medio informa sobre la exactitud de los datos, mientras más cercano esté el valor del promedio a los valores de  $n$ , entonces el ensayo habrá sido más confiable.

Para verificar la confiabilidad de los datos se utilizó el método de la desviación estándar de la siguiente manera:

- Se establece un intervalo de deformaciones para todas las probetas de la serie.
- Para cada uno de los intervalos anteriores, se tabula el valor correspondiente fuerza.
- Los datos de esfuerzo correspondientes a una misma deformación se promedian en un único valor.
- Se verifica la confiabilidad del promedio como valor representativo mediante la desviación estándar por el método de los mínimos cuadrados:

$$\text{desvest} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

Donde  $\bar{x}$  es el promedio y  $n$  es el tamaño de la muestra. En la tabla 9 se muestra el resultado del análisis anterior sobre la figura 7:

Deformación (m/m)	Esfuerzo (MPa)	Desv Est (MPa)
0	0	0
0,00833	9,56	0,87
0,01667	15,28	0,71
0,02500	20,94	0,65
0,03333	26,40	0,74
0,04167	32,14	0,75
0,05000	38,01	1,10
0,05833	42,91	1,01
0,06667	47,29	0,92
0,07500	50,98	1,29
0,08333	53,61	2,04
0,09167	54,37	2,65
0,09800	54,00	3,20

Tabla 9. Análisis de confiabilidad de datos para la figura 7.

A partir de los datos de esfuerzo y deformación de la tabla 9, se genera un nuevo gráfico (figura 8) que representa el comportamiento promedio de las cinco probetas de la muestra, las probetas de la figura 7.

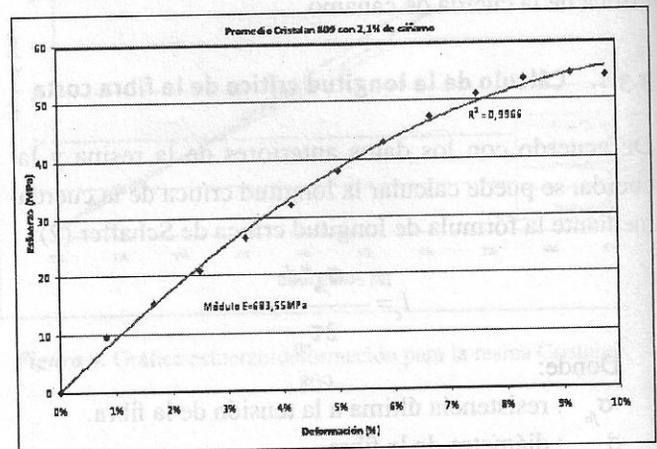


Figura 8. Gráfico promedio generado con los datos de la tabla 9, correspondientes al refuerzo con 2.1% de cáñamo.

Nótese que la desviación estándar se mantiene en un nivel bajo, por lo que se puede deducir que los datos son confiables y representativos.

Como herramientas de análisis adicionales, se determinó, para este gráfico promedio, el coeficiente de determinación con las fórmulas:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Donde:

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$SST = (\sum Y_i^2) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}$$

### 3.6. Análisis de propiedades mecánicas principales

Además de tener los diagramas de esfuerzo-deformación de cada serie de probetas, se han elaborado también gráficos de esfuerzo de fractura vs. porcentaje de fibra y modulo de elasticidad vs. porcentaje de fibra. Se elaboraron tanto para el refuerzo con fibra continua como para el de fibra corta.

### 3.6.1. Fibra continua

Como se puede apreciar en la figura 9, el esfuerzo de fractura presenta variaciones del orden de los 10MPa hasta una fracción volumétrica de 4.2%, valor después del cual se presenta una caída brusca del esfuerzo hasta un 6.3% de refuerzo, en seguida sucede una nueva caída, esta vez menos abrupta que la anterior, entre el 8.4 y 10.5%.

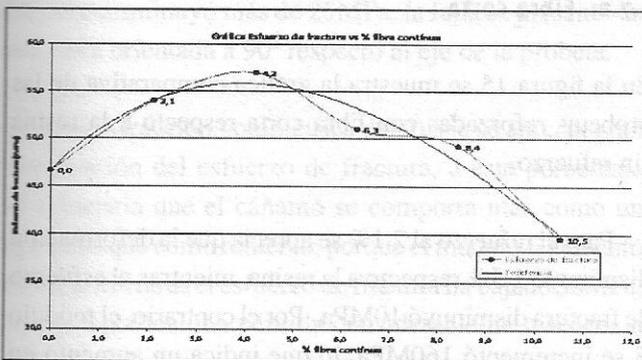


Figura 9. Gráfica esfuerzo de fractura vs. % fibra continua.

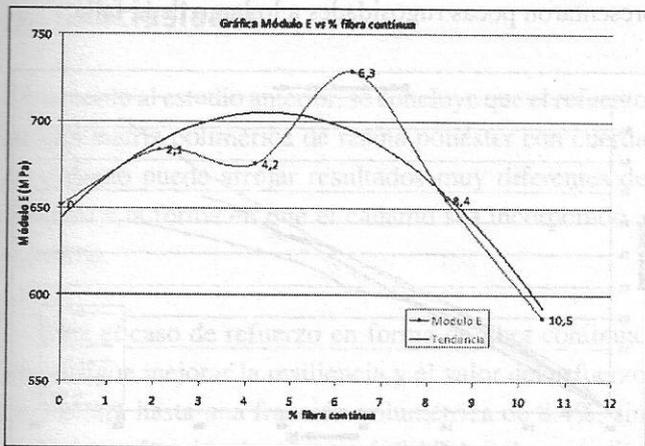


Figura 10. Gráfica modulo de elasticidad vs. % fibra continua.

En cuanto al módulo de elasticidad (figura 10), el valor del mismo aumentó (de 651.9MPa en la resina sin refuerzo, a 728.6MPa para una fracción volumétrica de 6.3%), debido al aumento en la deformación unitaria, a partir de 6.3% de cáñamo se presenta una caída brusca del módulo; sin embargo, la caída no representa una pérdida significativa para estos porcentajes de fibra, teniendo en cuenta que la deformación elástica aumentó, lo que significa que el material se volvió más resiliente<sup>1</sup>.

1 La resiliencia se define como la energía que puede almacenar un material durante su deformación elástica.

### 3.6.2. Fibra corta

Para el caso del material con fibra corta se aprecia que el esfuerzo de fractura (figura 11) fue disminuyendo progresivamente conforme la fracción volumétrica se iba incrementando, esto significa que este tipo de refuerzo es apropiado cuando se desea obtener un material muy rígido; como puede verse en la figura 12 se aprecia un continuo aumento del módulo de elasticidad, es evidente que la deformación unitaria se reduce.

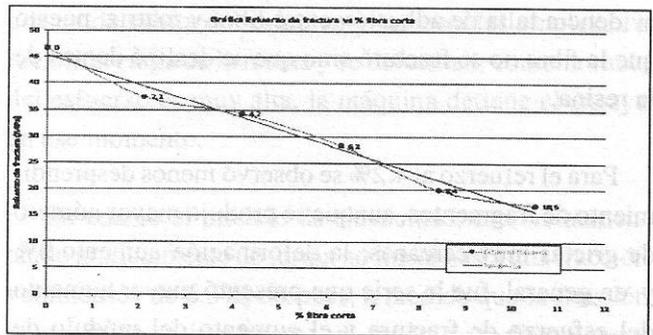


Figura 11. Gráfica esfuerzo de fractura vs. % fibra corta.

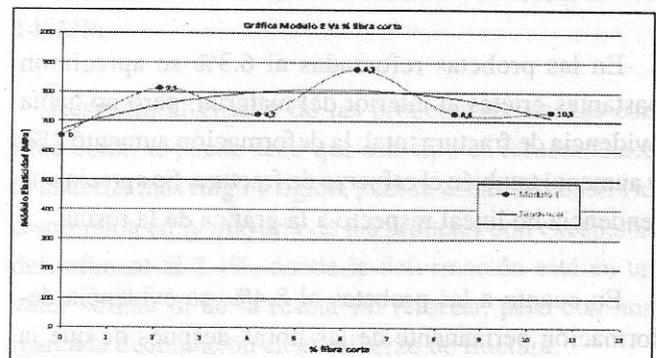


Figura 12. Gráfico módulo de elasticidad vs. % fibra corta.

## 3.7. Análisis de falla y comparación frente a la resina sin refuerzo

### 3.7.1. Fibra continua

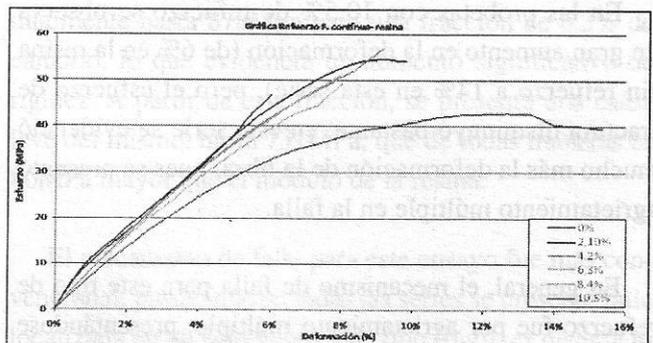


Figura 13. Comparativo material compuesto-resina sin refuerzo.

En la figura 13 se aprecia la gráfica comparativa de las probetas reforzadas con fibra continua respecto a la resina sin refuerzo.

Para el caso del refuerzo al 2.1% se observó un desprendimiento de grandes fragmentos de matriz en los lugares próximos a la falla, la fractura fue típica frágil, debido a que esta presentaba pocas rugosidades y estaba localizada en un solo punto. A pesar de que la deformación aumentó 4% respecto a la resina sin reforzar, se evidencia falta de adhesión entre fibra y matriz, puesto que la fibra no se fracturó sino que se deslizó dentro de la resina.

Para el refuerzo al 4.2% se observó menos desprendimiento de fragmentos, aunque se produjo mayor número de grietas muy cercanas; la deformación aumento 3% y, en general, fue la serie que presentó mayor aumento del esfuerzo de fractura y el aumento del módulo de elasticidad fue moderado.

En las probetas reforzadas al 6.3% se apreciaron bastantes grietas al interior del material, pero no había evidencia de fractura total, la deformación aumentó 2%, y aumentó también el esfuerzo de fractura. Se aprecia una tendencia no lineal respecto a la gráfica de la resina.

En cuanto a las probetas al 8.4%, se evidencia deformación permanente de las fibras después de que la resina se fractura; se presentó agrietamiento múltiple. En general se presentó buena transmisión de la carga hasta la ruptura de la matriz; ni el módulo E ni el esfuerzo de fractura difirió en gran medida de los valores de la resina sin reforzar.

En las probetas con 10.5% de refuerzo se observa un gran aumento en la deformación (de 6% en la resina sin refuerzo a 14% en esta serie), pero el esfuerzo de fractura disminuyó bastante, en esta serie se evidenció mucho más la deformación de la fibra, pues se presentó agrietamiento múltiple en la falla.

En general, el mecanismo de falla para este tipo de refuerzo fue por agrietamiento múltiple, presentándose deformación de la fibra posterior a la falla de la matriz.

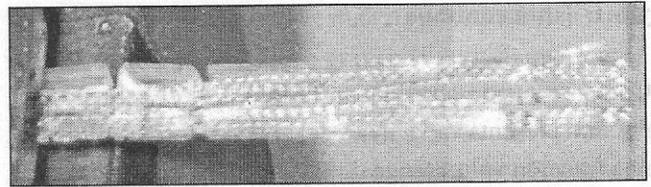


Figura 14. Mecanismo de falla común al refuerzo de fibra continua.

### 3.7.2. Fibra corta

En la figura 15 se muestra la gráfica comparativa de las probetas reforzadas con fibra corta respecto a la resina sin refuerzo.

Para el refuerzo al 2.1% se aprecia que la deformación disminuyó 1.5% respecto a la resina, mientras el esfuerzo de fractura disminuyó 10MPa. Por el contrario, el módulo E se incrementó 160MPa, lo que indica un aumento en la rigidez del material, la fractura fue frágil, es decir, se presentaron pocas rugosidades a lo largo de la falla.

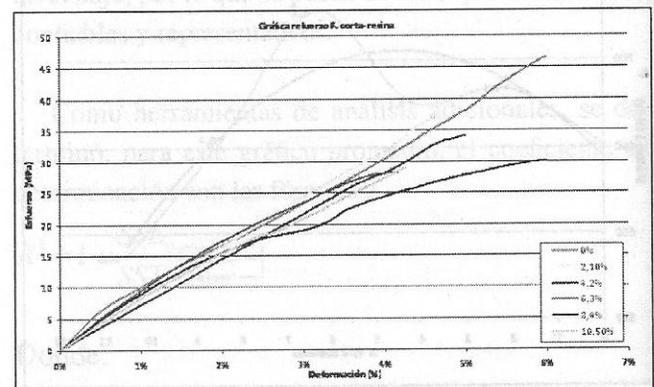


Figura 15. Comparativo material compuesto Fibra corta-resina.

Para las probetas con 4.2% de refuerzo, se presentaron más rugosidades en la fractura, la rigidez se siguió incrementando (6% de deformación en la resina a 5% en el material reforzado), el módulo E cayó ligeramente a 724MPa, pero el esfuerzo de fractura disminuyó más de 10MPa respecto de la resina.

En cuanto a las probetas reforzadas al 6.3% se desprendieron varios fragmentos de resina en el lugar de la falla, se observó que la falla se presenta donde hay una fibra orientada perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta; la deformación ha ido disminuyendo más, el

módulo E aumentó hasta 878MPa, el valor más alto de la serie, sin embargo, el esfuerzo de fractura ha disminuido 20MPa respecto a la resina sin reforzar.

En el material reforzado con 8.4% de cuerda se encontró que debido a la cantidad de fibras la probeta no se fracturó por completo, sino que hubo deslizamiento de fibras; el módulo E cayó abruptamente y el esfuerzo de fractura disminuyó más de 25MPa, la falla se presentó en una fibra orientada a 90° respecto al eje de la probeta.

Con la fracción volumétrica de 10.5% se aprecia gran disminución del esfuerzo de fractura, a este porcentaje se evidencia que el cáñamo se comporta más como un agregado que como refuerzo, porque el módulo E aumentó 80MPa, mientras el esfuerzo de fractura ha bajado 30MPa, lo que significa una pérdida considerable de resistencia del material.

#### 4. Conclusiones

De acuerdo al estudio anterior, se concluye que el refuerzo de una matriz polimérica de resina poliéster con cuerda de cáñamo puede arrojar resultados muy diferentes de acuerdo a la forma en que el cáñamo sea incorporado a la matriz.

Para el caso de refuerzo en forma de fibra continua, se consigue mejorar la resiliencia y el valor del esfuerzo de fractura hasta una fracción volumétrica de 8.4%, sin embargo un fracción de refuerzo de 2.1% brinda una mejor proporción entre esfuerzo de fractura y resiliencia alta, haciendo que el material se deforme un poco más antes de su ruptura. Con el refuerzo al 10.5% aumenta bastante la resiliencia, pero el esfuerzo de fractura disminuye fuertemente, así como también sucede con el módulo de elasticidad.

El comportamiento del material es bastante similar entre las fracciones volumétricas de 4.2 y 6.3%.

El mecanismo de falla fue común a todas las fracciones volumétricas tal como se aprecia en la figura 14; esto se debe posiblemente a la naturaleza de la fibra y la matriz; al comparar las gráficas de esfuerzo de formación

de la resina y el cáñamo (figuras 4 y 5), se nota que la deformación unitaria de la cuerda de cáñamo supera con creces a la deformación de la resina (6% en la resina frente a 25% en la cuerda), cuando generalmente en el caso de los refuerzos con fibras sintéticas la deformación de la fibra es mucho menor que la de la matriz; debido a este hecho, la carga que transfiere la matriz a la cuerda no es suficiente para provocar la fractura de la misma, sino que solo da lugar a una deformación, hasta el punto de que la matriz no soporta más y se fractura, se produce una caída súbita del esfuerzo y las cuerdas empiezan a recibir la carga de la resina y se deforman; como la caída del esfuerzo es muy alta, la máquina detiene el ensayo en ese momento.

En cuanto al módulo de elasticidad, este va aumentando gradualmente de forma no lineal hasta una fracción volumétrica de 6.3%, después, a medida que la fracción volumétrica se incrementa, el módulo va disminuyendo drásticamente, la disminución es del orden de los 140MPa.

Respecto al ensayo de las probetas reforzadas con fibra corta, se puede decir que este tipo de refuerzo hace al material más frágil y rígido, pues la zona elástica se vio disminuida en la mayoría de las probetas con excepción del refuerzo al 8.4%, donde la deformación está en un valor similar al de la resina sin reforzar, pero con una marcada disminución en el esfuerzo de fractura.

Al haber aumentado la fragilidad, se deduce que de la misma forma ha aumentado el módulo de elasticidad, mientras para la fracción volumétrica de 2.1% el módulo se incrementó 160MPa (de 651 a 813MPa) aproximadamente, para los demás valores fue aumentando gradualmente hasta 878MPa para una fracción de 6.3% de cáñamo, lo que evidencia un aumento significativo de rigidez. A partir de esta fracción, se presenta una caída leve del mismo, hasta 731MPa, que de todas maneras es 80MPa mayor que el módulo de la resina.

El mecanismo de falla para este ensayo fue más convencional, puesto que en todas las series se presentó falla localizada en un solo punto y de tipo frágil, es decir, a lo largo de la falla se aprecia poca rugosidad superficial.

En cuanto al proyecto en general, se evidenció que la deformación de la cuerda fue mayor que la de la resina para la mayoría de los ensayos, puesto que no se llegó a producir la fractura de la cuerda como tal, sino que se producía deformación permanente de la misma después de la fractura de la matriz.

Los datos arrojados por el ensayo de la cuerda de cáñamo, así como las observaciones de su comportamiento en los ensayos del material compuesto muestran que debido a la gran deformación que experimenta, sería un refuerzo más apropiado para reforzar una matriz dúctil, como, por ejemplo, una de tipo termoplástica.

## Referencias

- [1] André, A., "Fibres for Strengthening of Timber Structures" [en línea], disponible en: <http://epubl.ltu.se/1402-1528/2006/03/LTU-FR-0603-SE.pdf>, marzo de 2006, recuperado: 20 de octubre de 2007.
- [2] Norton, R., Diseño de maquinas, México, Pearson, 1999, pp. 250-254.
- [3] Schaffer, J., Ciencia y diseño de ingeniería de los materiales, México, Grupo Patria Cultural, 2000, pp. 558-559; pp. 571-573.