

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON  
FIBRA DE CABUYA MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**NAPOLEÓN ANDRÉS TAMAYO DUQUE**

**andrestochi@hotmail.com**

**DIRECTOR: VICTOR HUGO GUERRERO, Ph.D.**

**victor.guerrero@epn.edu.ec**

**Quito, junio de 2012**

## DECLARACIÓN

Yo, Napoleón Andrés Tamayo Duque, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Napoleón Andrés Tamayo Duque**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente proyecto de titulación fue realizado bajo mi supervisión y en su totalidad por Napoleón Andrés Tamayo Duque.

---

**Víctor Guerrero, Ph.D.**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a Dios por darme la salud necesaria y permitirme alcanzar esta meta tan valiosa en mi vida.

Agradezco infinitamente a mis padres, Napoleón y Nancy, porque en el camino que yo elegí seguir me han dado tantas experiencias de vida, ellos me han brindado siempre su apoyo incondicional y me han guiado correctamente con preocupación, por lo que les estaré agradecido el resto de mi vida.

Agradezco a mis hermanos, que han sabido acompañarme y brindarme el ánimo necesario para seguir avanzado, por enseñarme a ser perseverante ante cualquier obstáculo y buscar ser mejor día tras día.

Agradezco a mis amigos, que han compartido conmigo tantas experiencias a lo largo de mi carrera. Han estado en los momentos buenos y malos, pero siempre apoyándome para estudiar con dedicación.

Agradezco a las personas que han estado pendientes de mí y me han ayudado de una u otra forma a alcanzar mis objetivos, sin ellos todo hubiese sido más complicado. Doy gracias al Dr. Víctor Guerrero y al Ing. José Luis Dávila por haberme brindado su ayuda en la elaboración de este proyecto.

**ANDRÉS**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, porque siempre han estado apoyándome con el mayor de sus esfuerzos. Les dedico este trabajo a ellos porque me brindaron la oportunidad de estudiar y seguir adelante; me enseñaron la responsabilidad y el trabajo duro. Pero sobre todo les dedico a ellos este trabajo por brindarme la oportunidad de soñar.

**ANDRÉS**

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b> .....	<b>vi</b>
<b>CONTENIDO DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>CONTENIDO DE TABLAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xxiv</b>
<b>PRESENTACIÓN</b> .....	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>1</b>
1.1. FIBRA, HILOS Y TEJIDO DE CABUYA.....	1
1.1.1. FIBRA DE CABUYA.....	3
1.1.1.1. Propiedades y Aplicaciones de la Fibra de Cabuya.....	3
1.1.1.2. Diferencias entre Fibras de Cabuya y Yute.....	6
1.1.2. HILO DE CABUYA.....	7
1.1.3. TEJIDO DE CABUYA.....	9
1.2. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES.....	10
1.3. PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS.....	19
1.4. VARIABLES DE PROCESAMIENTO POR ESTRATIFICACIÓN.....	41
1.4.1. VARIABLES DE PROCESO DE CURADO DE LA RESINA POLIÉSTER.....	43
1.4.2. MAQUINADO DE COMPUESTOS.....	45
1.5. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	49
1.5.1. OBJETIVOS.....	49
1.5.2. ALCANCE.....	50
<b>CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>52</b>
2.1. MATERIALES Y EQUIPOS.....	52
2.1.1. MATERIALES.....	53
2.1.1.1. Fibra de Cabuya.....	53
2.1.1.2. Resina Poliéster.....	54
2.1.2. EQUIPOS.....	55

2.2.	ENSAYOS PRELIMINARES.....	62
2.2.1.	CÁLCULO DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE REFUERZO .....	63
2.2.2.	ENSAYOS PRELIMINARES DE PROBETAS A TRACCIÓN .....	64
2.2.3.	ENSAYOS PRELIMINARES DE PROBETAS A FLEXIÓN .....	67
2.3.	CARACTERIZACIÓN DE HILOS Y TEJIDOS DE CABUYA.....	69
2.3.1.	DENSIDAD DE RESINA POLIÉSTER .....	69
2.3.2.	CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DE HILOS DE CABUYA.....	70
2.3.3.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE HILOS DE CABUYA .....	72
2.3.4.	DENSIDAD DE HILO FINO DE CABUYA.....	73
2.3.5.	CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DE TEJIDOS DE CABUYA.....	75
2.3.6.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE TEJIDOS DE CABUYA .....	77
2.3.7.	DENSIDAD DE TEJIDO NORMAL DE CABUYA.....	77
2.4.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	79
2.4.1.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	79
2.4.2.	ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS .....	82
2.4.2.1.	Probetas para ensayos a tracción .....	90
2.4.2.2.	Probetas para ensayos a flexión.....	93
2.4.2.3.	Probetas para ensayos a impacto .....	96
2.5.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	100
2.5.1.	CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN .....	100
2.5.2.	CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	101
2.5.3.	CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA AL IMPACTO.....	103
2.6.	OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO .....	105
2.6.1.	ANÁLISIS FUNCIONAL .....	105
2.6.2.	POSIBLES PROTOTIPOS A REALIZARSE.....	108
2.6.3.	MÉTODO ORDINAL DE CRITERIOS PONDERADOS PARA SELECCIÓN DE POSIBLES PROTOTIPOS A REALIZARSE .....	109
2.6.4.	POSIBLES DISEÑOS A REALIZARSE .....	112
2.6.5.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	114
2.6.5.1.	Alternativa de diseño A (atractivo).....	114
2.6.5.2.	Alternativa de diseño B (práctico).....	114
2.6.5.3.	Alternativa de diseño C (clásico).....	115
2.6.6.	MÉTODO ORDINAL DE CRITERIOS PONDERADOS PARA SELECCIÓN DE POSIBLES DISEÑOS A REALIZARSE .....	115

2.6.7.	FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO.....	119
2.7.	EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO.....	126
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>133</b>
3.1.	DISCUSIÓN DE ENSAYOS PRELIMINARES Y CARACTERIZACIÓN DE HILOS Y TEJIDO DE CABUYA .....	133
3.2.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS REALIZADOS DE TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO.....	136
3.2.1.	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	136
3.2.2.	ENSAYO DE FLEXIÓN.....	151
3.2.3.	ENSAYO DE IMPACTO .....	168
3.3.	COMPUESTOS POLIÉSTER-CABUYA FRENTE A OTROS MATERIALES COMPUESTOS.....	170
3.3.1.	COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES.....	171
3.3.2.	COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTER .....	174
3.3.3.	COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE OTRAS MATRICES .....	179
3.3.4.	COMPARACIÓN DE PROCESAMIENTO DE LAS DIFERENTES FIBRAS NATURALES.....	182
3.4.	DISCUSIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN .....	190
3.5.	DISCUSIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL COMPUESTO.....	191
3.6.	DISCUSIÓN SOBRE EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO.....	192
<b>CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>198</b>
4.1.	CONCLUSIONES .....	198
4.2.	RECOMENDACIONES.....	203
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>205</b>



**ANEXOS ..... 209**

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1.	Uso de fibras naturales en la industria automotriz y otros sectores .....	2
Figura 1.2.	Planta y fibra de cabuya ( <i>Furcraea Andina</i> ).....	3
Figura 1.3.	Algunas aplicaciones de la fibra de cabuya .....	6
Figura 1.4.	Esquema del proceso de hilado.....	8
Figura 1.5.	Estructura básica del tejido plano .....	10
Figura 1.6.	Matrices termoestables: Ejemplo de propiedades mecánicas.....	11
Figura 1.7.	Compuestos reforzados con fibras naturales: (a) poliéster-abacá-fibra de vidrio; (b) poliéster-coco-fibra de vidrio; (c) polipropileno-abacá- fibra de vidrio .....	15
Figura 1.8.	Curvas esfuerzo deformación: (a) PP (100%); (b) PP/vidrio (70/30); (c) PLA (100%); (d) PLA/RNCF; (e) PLA/vidrio (70/30) .....	18
Figura 1.9.	Propiedades a tracción de ciertos compuestos reforzados con fibra natural: (1) PLA; (2) PLA/vidrio (70/30); (3) PLA/RNCF (70/30); (4) PLA/Madera (70/30); (5) PLA/bambú (70/30); (6) PLA bambú tratado con NaOH (70/30) (7) PLA/bambú tratado con silano (70/30); (8) PP; (9) PP/vidrio (70/30); (10) PP/RNCF (70/30); (11) PP/bambú (70/30); (12) PP/bambú tratado con NaOH (70/30); (13) PP/bambú tratado con silano (70/30) (MOE=módulo de elasticidad).....	18
Figura 1.10.	Propiedades a tracción de ciertos compuestos reforzados con fibra natural: (1) PLA; (2) PLA/vidrio (70/30); (3) PLA/RNCF (70/30); (4) PLA/Madera (70/30); (5) PLA/bambú (70/30); (6) PLA bambú tratado con NaOH (70/30) (7) PLA/bambú tratado con silano (70/30); (8) PP; (9) PP/vidrio (70/30); (10) PP/RNCF (70/30); (11) PP/madera;(12) PP/bambú (70/30); (13) PP/bambú tratado	

	con NaOH (70/30); (14) PP/bambú tratado con silano (70/30) .....	19
Figura 1.11.	Curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de materiales compuestos de matriz de poliéster reforzados con distintos tipos y configuraciones de fibra: (a) 15 vol% de refuerzo; (b) 20 vol% de refuerzo.....	24
Figura 1.12.	Curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio .....	25
Figura 1.13.	Esfuerzo máximo a la tracción específico vs. módulo de elasticidad específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos.....	26
Figura 1.14.	Esfuerzo máximo a flexión específico vs. módulo de elasticidad a flexión específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos .....	27
Figura 1.15.	Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico a la tracción para compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de coco y vidrio .....	28
Figura 1.16.	Resistencia específica a la flexión vs. módulo específico para compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de coco y vidrio .....	29
Figura 1.17.	Curvas esfuerzo vs. deformación de materiales compuestos PLA-abacá .....	37
Figura 1.18.	Influencia de diferentes fibras naturales en el esfuerzo máximo a tracción y la energía de impacto para ensayo charpy con muesca en compuestos de PLA .....	37
Figura 1.19.	Esquema de procesamiento por estratificación .....	43
Figura 1.20.	Algunas herramientas de corte .....	47
Figura 1.21.	Proceso de taladrado: (a) delaminación a la salida de la broca; (b) delaminación a la entrada de la broca .....	48
Figura 2.1.	Muestras de: (a) hilo de cabuya; (b) tejido de cabuya .....	53
Figura 2.2.	Moldes de: (a) tracción; (b) flexión; (c) impacto .....	55

Figura 2.3.	Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción, según la norma ASTM D 3039-08 .....	56
Figura 2.4.	Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión, según la norma ASTM D 7264-07 .....	56
Figura 2.5.	Dimensiones de la probeta para ensayo de impacto, según la norma ASTM D5628-10 .....	57
Figura 2.6.	Balanza electrónica digital AE ADAM .....	57
Figura 2.7.	Prensa hidráulica manual .....	58
Figura 2.8.	Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25K-S UTM.....	59
Figura 2.9.	Mordazas cuneiformes y extensómetro .....	59
Figura 2.10.	Equipo de flexión a tres puntos.....	60
Figura 2.11.	Equipo de caída de dardo.....	60
Figura 2.12.	Accesorios de equipo de impacto: (a) anillo de sujeción; (b) dardo hemisférico .....	61
Figura 2.13.	Estufa Venticell. ....	61
Figura 2.14.	Metodología experimental de ensayos preliminares.....	63
Figura 2.15.	Compuesto reforzado con hilo fino de cabuya .....	66
Figura 2.16.	Compuesto reforzado con: (a) tejido grueso; (b) tejido normal; (c) tejido fino .....	67
Figura 2.17.	Probeta de resina poliéster .....	70
Figura 2.18.	Hilo de cabuya: (a) grueso; (b) fino.....	71
Figura 2.19.	Ensayo de tracción en hilo fino de cabuya.....	73
Figura 2.20.	Probeta de material compuesto reforzado con hilo de cabuya .....	75
Figura 2.21.	Tipos de tejido de cabuya: (a) tejido grueso; (b) tejido normal; (c) tejido fino .....	76
Figura 2.22.	Probeta de material compuesto reforzado con tejido de cabuya .....	78
Figura 2.23.	Esquema de estrategia metodológica.....	82
Figura 2.24.	Esquema de elaboración de probetas .....	83
Figura 2.25.	Diagrama de flujo del proceso de elaboración de probetas .....	84
Figura 2.26.	Aplicación de cera desmoldante .....	86
Figura 2.27.	Mezcla de resina, estireno y octoato de cobalto .....	86

Figura 2.28.	Mezcla final para matriz .....	87
Figura 2.29.	Estratificación del compuesto: (a) colocación de resina; (b) colocación de fibra de cabuya .....	88
Figura 2.30.	Cierre de molde .....	88
Figura 2.31.	Ubicación de molde en prensa hidráulica .....	89
Figura 2.32.	Probetas para ensayos a tracción.....	93
Figura 2.33.	Probetas para ensayos a flexión.....	96
Figura 2.34.	Tablero para extraer probetas de impacto .....	98
Figura 2.35.	Probetas para ensayos de impacto.....	98
Figura 2.36.	Orientaciones del tejido plano: (a) tejido orientado a 45° con respecto al eje de las probetas; (b) tejido orientado a 0° con respecto al eje de la probetas .....	99
Figura 2.37.	Molde de madera de dimensiones 71 x 71 cm .....	120
Figura 2.38.	Diseño del prototipo en las posiciones: (a) horizontal; (b) vertical .....	121
Figura 2.39.	Prototipos apilados .....	121
Figura 2.40.	Dimensiones del prototipo .....	125
Figura 2.41.	Diagrama de red del proceso de producción del prototipo.....	128
Figura 2.42.	Mostrador de vinos (producto final).....	132
Figura 3.1.	Fibra de cabuya: (a) hilo fino de (0,9 mm); (b) hilo grueso (1,5 mm) .....	134
Figura 3.2.	Fibra de cabuya: (a) tejido grueso (1,87 x 2,50 hilos/cm); (b) tejido normal (4,80 x 4,53 hilos/cm); (c) tejido fino (4,60 x 5,13 hilos/cm).....	135
Figura 3.3.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las primeras seis configuraciones realizadas de la Tabla 3.1 y resina poliéster.....	138
Figura 3.4.	Módulo de elasticidad a tracción de las primeras seis configuraciones realizadas de la Tabla 3.1 y resina poliéster..	139
Figura 3.5.	Esfuerzo máximo a tracción, módulo elástico e isotropía de L.E.15d.39%, T45°.E.15d.34% y T0°.E.15d.34%.....	141
Figura 3.6.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones T0°.E.15d.34%, A.E.15d.34%, T45°.E.15d.34%.....	142

Figura 3.7.	Esfuerzo máximo a tracción, módulo elástico e isotropía de las configuraciones T0°.E.15d.34%, A.E.15d.34% y T45°.E.15d.34%.....	143
Figura 3.8.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de compuestos con tejido alternado con diferentes esquemas de curado.....	144
Figura 3.9.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones T0°.E.15d.34% y T0°.15d.34% .....	145
Figura 3.10.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones A.E.15d.34% y A.15d.34%.....	146
Figura 3.11.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones A.16h.34% y resina poliéster .....	148
Figura 3.12.	Módulo de elasticidad de A.16h.34% y resina poliéster .....	149
Figura 3.13.	Fracturas observadas en (a) resina poliéster; (b) hilo de cabuya; (c) tejido orientado a 45°; (d) tejido orientado a 0°; (e) tejido alternado .....	151
Figura 3.14.	Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las primeras seis configuraciones realizadas de la Tabla 3.1 y de la resina poliéster.....	153
Figura 3.15.	Módulo de elasticidad a flexión de algunos materiales compuestos de cabuya-poliéster .....	154
Figura 3.16.	Esfuerzo máximo a flexión, módulo elástico e isotropía de L.E.15d.30%, T45°.E.15d.30% y T0°.E.15d.30%.....	156
Figura 3.17.	Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones T0°.E.15d.30%, A.E.15d.30%, T45°.E.15d.30%.....	157
Figura 3.18.	Esfuerzo máximo a flexión, módulo elástico e isotropía de las configuraciones T0°.E.15d.30%, A.E.15d.30% y T45°.E.15d.30%.....	158
Figura 3.19.	Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de compuestos con tejido alternado con diferentes procesos de curado.....	159
Figura 3.20.	Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de T0°.E.15d.30% y T0°.15d.30% .....	160
Figura 3.21.	Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones A.E.15d.30% y A.15d.30%.....	161

Figura 3.22.	Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones A.16h.30% y resina poliéster .....	163
Figura 3.23.	Módulo de elasticidad de las configuraciones A.16h.30% y resina poliéster.....	164
Figura 3.24.	Fracturas observadas en compuestos: (a) L.E.15d.23%; (b) L.E.15d.39%; (c) T45°.E.15d.26%; (d) T45°.E.15d.30%; (e) T0°.E.15d.26%; (f) T 0°.E.15d.30%; (g) A.E.15d.30%; (h) A.E.16h.30%; (i) A.E.24h.30%; (j) T0°.15d.30%; (k) A.15d.30%; (l) A.16h.30%.....	168
Figura 3.25.	Resistencia al impacto de la resina poliéster y A.16h.26%.....	169
Figura 3.26.	Falla observada en compuestos A.16h.26% ensayados a impacto .....	170
Figura 3.27.	Gráfico multiteje de compuestos elaborados con matriz poliéster reforzados con fibras naturales .....	173
Figura 3.28.	Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos de matriz poliéster reforzados con tejidos de cabuya y abacá .....	174
Figura 3.29.	Gráfico multiteje de compuestos híbridos elaborados con matriz de poliéster reforzados con fibras naturales y fibra de vidrio, compuestos poliéster-cabuya, poliéster y poliéster-fibra de vidrio .....	177
Figura 3.30.	Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y fibra de vidrio, compuestos poliéster-cabuya, poliéster-fibra de vidrio y poliéster .....	178
Figura 3.31.	Gráfico multiteje de compuestos poliéster cabuya y compuestos de otras matices .....	181
Figura 3.32.	Preparación de fibra corta de abacá; (a) corte de una sección de fibra; (b) selección y corte de fibra a la dimensión deseada; tamizado de fibra .....	183
Figura 3.33.	Preparación de fibra continua de abacá .....	184
Figura 3.34.	Telar manual.....	185
Figura 3.35.	Colocación de las fibras en las mallas de cada lizo .....	186
Figura 3.36.	Diagrama del proceso de extracción con la trituradora.....	187

Figura 3.37.	Comparación de los anchos de cáscara que ingresa a la trituradora, parte superior cáscaras de 5-6 cm, parte inferior cáscaras de 2-3 cm.....	188
Figura 3.38.	Preparación del equipo .....	188
Figura 3.39.	Tamizado de la fibras a la salida de la trituradora.....	189
Figura 3.40.	Selección de la fibra idónea a emplear en los ensayos .....	189
Figura 3.41.	Láminas de compuesto: (a) 3 mm; (b) 5 mm; (c) 7 mm .....	193
Figura 3.42.	Diagrama de flujo de elaboración del prototipo.....	195
Figura 3.43.	Pruebas de corte: (a) corte con sierra manual; (b) corte en mesa con sierra circular .....	196
Figura 3.44.	Prueba de taladrado .....	197



## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1.	Características mecánicas de diferentes fibras naturales y sintéticas .....	4
Tabla 1.2.	Composición química de diferentes fibras naturales.....	4
Tabla 1.3.	Características físicas de la fibra de cabuya.....	5
Tabla 1.4.	Diferencias entre fibra de cabuya y yute .....	7
Tabla 1.5.	Ventajas y desventajas de utilizar fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos .....	12
Tabla 1.6.	Eficiencia de las fibras dependiendo de su orientación .....	14
Tabla 1.7.	Ejemplo de propiedades para compuestos de varias matrices con dos diferentes refuerzos de fibra de vidrio.....	15
Tabla 1.8.	Ejemplos de propiedades de fibra corta de vidrio reforzando plásticos.....	16
Tabla 1.9.	Resumen de propiedades a tracción de varios materiales compuestos.....	17
Tabla 1.10.	Propiedades mecánicas promedio de tracción y flexión de compuestos de matriz poliéster reforzados con diferentes fibras.....	21
Tabla 1.11.	Compuestos híbridos de yute y fibra de vidrio en matrices epoxy y poliéster.....	29
Tabla 1.12.	Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras corta y unidireccional.....	30
Tabla 1.13.	Propiedades de compuestos de matriz poliéster reforzados con yute y vidrio .....	30
Tabla 1.14.	Propiedades específicas de ciertos materiales metálicos y varios compuestos .....	31
Tabla 1.15.	Propiedades mecánicas de compuestos de polietileno reforzados con fibras de abacá.....	32
Tabla 1.16.	Cuadro general de resultados de las propiedades mecánicas de compuestos híbridos de polipropileno, fibra de abacá y fibra de vidrio .....	33
Tabla 1.17.	Propiedades mecánicas a tracción de materiales compuestos de PLA-abacá.....	36

Tabla 1.18.	Rangos de valores de las propiedades mecánicas de los diferentes compuestos de matriz termoestable y termoplástica.....	38
Tabla 1.19.	Resumen de resultados de varios materiales ensayados a impacto .....	40
Tabla 1.20.	Tiempos de gel de la resina poliéster ANDERPOL 859 a 25°C con diferentes cantidades de MEKP y octoato de cobalto .....	45
Tabla 1.21.	Tiempos de gel del ANDERPOL 859 con 1% de MEKP diferentes y diferentes cantidades de octoatode cobalto .....	45
Tabla 2.1.	Caracterización de hilos y tejidos de cabuya .....	53
Tabla 2.2.	Fórmula general recomendada para el curado .....	54
Tabla 2.3.	Configuración para la elaboración de la matriz de resina poliéster y presión aplicada .....	62
Tabla 2.4.	Características de probetas usadas en ensayos preliminares a tracción.....	65
Tabla 2.5.	Características de las probetas usadas en ensayos preliminares a flexión .....	68
Tabla 2.6.	Dimensiones de la probeta de la resina poliéster .....	69
Tabla 2.7.	Diámetros de hilos de cabuya.....	71
Tabla 2.8.	Resistencia a la tracción de hilo de cabuya .....	72
Tabla 2.9.	Valores del proceso iterativo en el cálculo de la densidad del hilo de cabuya .....	74
Tabla 2.10.	Dimensiones, masa, volumen y densidad de la probeta reforzada con fibra de cabuya.....	75
Tabla 2.11.	Caracterización dimensional de tejidos de cabuya .....	76
Tabla 2.12.	Resistencia a la tracción de tejido normal de cabuya .....	77
Tabla 2.13.	Valores del proceso iterativo en el cálculo de densidad del tejido de cabuya.....	78
Tabla 2.14.	Dimensiones, masa, volumen y densidad de la probeta reforzada con tejido de cabuya .....	79
Tabla 2.15.	Cantidad de resina requerida para remojar una determinada cantidad de fibra .....	85

Tabla 2.16.	Cantidad determinada de elementos constitutivos de la matriz para probetas de tracción.....	90
Tabla 2.17.	Designación y significado para probetas de tracción.....	91
Tabla 2.18.	Cantidad determinada de elementos constitutivos de la matriz por probeta de flexión.....	93
Tabla 2.19.	Designación y significado para probetas de flexión .....	94
Tabla 2.20.	Cantidad determinada de elementos constitutivos de la matriz por probeta de impacto .....	97
Tabla 2.21.	Dimensiones de la probeta de tracción.....	100
Tabla 2.22.	Dimensiones de la probeta de flexión.....	102
Tabla 2.23.	Dimensiones de la probeta de impacto.....	103
Tabla 2.24.	Valoración de las características del material.....	107
Tabla 2.25.	Alternativas para la fabricación de prototipo .....	108
Tabla 2.26.	Resultado de la valoración de los criterios de selección del prototipo.....	110
Tabla 2.27.	Peso específico del criterio de funcionalidad .....	111
Tabla 2.28.	Peso específico del criterio de conformado .....	111
Tabla 2.29.	Peso específico del criterio de costo.....	111
Tabla 2.30.	Peso específico del criterio de vida útil.....	111
Tabla 2.31.	Peso específico del criterio de futuro éxito en el mercado .....	112
Tabla 2.32.	Conclusión del método de selección de alternativas .....	112
Tabla 2.33.	Alternativas de diseño.....	113
Tabla 2.34.	Resultado de la valoración de los criterios de selección del diseño .....	116
Tabla 2.35.	Peso específico del criterio de estabilidad.....	117
Tabla 2.36.	Peso específico del criterio de peso .....	117
Tabla 2.37.	Peso específico del criterio de factibilidad de fabricación .....	117
Tabla 2.38.	Peso específico del criterio de estética.....	118
Tabla 2.39.	Peso específico del criterio de costo.....	118
Tabla 2.40.	Peso específico del criterio de tiempo de producción .....	118
Tabla 2.41.	Conclusión del método de selección de alternativas de diseño .....	118

Tabla 2.42.	Cantidades de resina, octoato de cobalto, MEKP y fibra tejida utilizados para obtener diferentes espesores en el compuesto y la fracción volumétrica .....	119
Tabla 2.43.	Proceso de fabricación del prototipo.....	122
Tabla 2.44.	Costo de fabricación del molde.....	126
Tabla 2.45.	Costo de materia prima en tablero de 3 mm de espesor .....	127
Tabla 2.46.	Costo de materia prima en tablero de 5 mm de espesor .....	127
Tabla 2.47.	Costo de servicios básicos utilizados.....	127
Tabla 2.48.	Costo de mano de obra .....	129
Tabla 2.49.	Costo de fabricación de cada prototipo.....	129
Tabla 3.1.	Resultados de ensayos de tracción .....	137
Tabla 3.2.	Incremento en esfuerzo máximo y módulo de elasticidad a tracción de diferentes materiales compuestos con respecto a la resina poliéster.....	140
Tabla 3.3.	Resultados de ensayos a flexión .....	152
Tabla 3.4.	Incremento en esfuerzo máximo y módulo de elasticidad a flexión de diferentes materiales compuestos con respecto a la resina poliéster.....	155
Tabla 3.5.	Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con diferentes fibras naturales .....	171
Tabla 3.6.	Propiedades mecánicas de las mejores configuraciones de compuestos híbridos con matriz poliéster.....	175
Tabla 3.7.	Incrementos de las propiedades mecánicas en configuraciones de compuestos híbridos con matriz poliéster con relación a los compuestos con refuerzo de la fibra natural respectiva.....	176
Tabla 3.8.	Energía absorbida al impacto de compuestos híbridos con matriz poliéster, poliéster, poliéster-fibra de vidrio, poliéster-cabuya y los respectivos incrementos con respecto a la matriz de poliéster.....	179
Tabla 3.9.	Propiedades mecánicas de compuestos poliéster-cabuya y compuestos de otras matrices. ....	180
Tabla 3.10.	Valores de temperatura y tiempo de secado para la fibra corta de abacá .....	183

Tabla 3.11.	Resumen de ventajas y desventajas del proceso de fabricación .....	190
Tabla 3.12.	Resumen de ventajas y desventajas del proceso del compuesto .....	191
Tabla 3.13.	Costo final de prototipos .....	194

## SIMBOLOGÍA

$\rho$	<p>Densidad</p> <p>masa</p> <p>volumen</p> <p>densidad de la fibra</p> <p>densidad inicial de la fibra</p> <p>masa de fibra</p> <p>volumen de fibra</p> <p>fracción volumétrica de fibra</p> <p>densidad de la matriz</p> <p>masa de matriz</p> <p>volumen de matriz</p> <p>fracción volumétrica de matriz</p> <p>densidad de la matriz</p> <p>masa de matriz</p> <p>volumen de matriz</p> <p>masa de matriz</p> <p>volumen de matriz</p> <p>densidad real de la probeta</p> <p>densidad teórica de la probeta</p> <p>esfuerzo máximo a tracción</p> <p>desviación estándar del esfuerzo máximo a tracción</p> <p>coeficiente de variación del esfuerzo máximo a tracción</p> <p>módulo de elasticidad a tracción</p> <p>desviación estándar del módulo de elasticidad a tracción</p> <p>coeficiente de variación del módulo de elasticidad a tracción</p> <p>deformación a tracción</p> <p>desviación estándar de la deformación a tracción</p> <p>coeficiente de variación de la deformación a tracción</p> <p>esfuerzo máximo a flexión</p> <p>desviación estándar del esfuerzo máximo a flexión</p> <p>coeficiente de variación del esfuerzo máximo a flexión</p> <p>módulo de elasticidad a flexión</p> <p>desviación estándar del módulo de elasticidad a flexión</p> <p>coeficiente de variación del módulo de elasticidad a flexión</p> <p>deformación a flexión</p> <p>desviación estándar de la deformación a flexión</p> <p>coeficiente de variación de la deformación a flexión</p>
°C	grado Celsius
g	gramo
m	metro
cm	centímetro
mm	milímetro

Pa	Pascal
MPa	megapascal
N	Newton
psi	libra/pulgada <sup>2</sup>
s	segundo
kg	kilogramo
J	Joule

## RESUMEN

Las fibras vegetales, que han contribuido históricamente al bienestar de la humanidad, actualmente están recuperando el espacio perdido por la aparición del plástico y las fibras sintéticas, y esto ocurre debido a que son insumos ventajosos en sostenibilidad y protección del ambiente, sobre todo por sus características biodegradables. Precisamente los intereses o preferencias de la sociedad moderna están creando un nuevo concepto de mercado global, con énfasis en la mitigación del deterioro del planeta. Actualmente, uno de los requisitos para la competitividad empresarial es la producción amigable con el medio ambiente. En el presente estudio, la fibra utilizada es la cabuya, la cual no solo es comercializada por sus buenas propiedades mecánicas, sino también por el aspecto agradable que ofrece a la vista del ser humano. Su color, textura natural y otra serie de características físicas son de gran interés en el mercado local. Uno de los objetivos del trabajo es el aprovechamiento de las propiedades mecánicas y comerciales de la fibra de cabuya dentro de una matriz de resina poliéster.

El presente proyecto de titulación se centra en la elaboración y caracterización mecánica de compuestos poliéster-cabuya. En un inicio, se realizaron una serie de ensayos preliminares con varios hilos y tejidos planos de cabuya existentes en el mercado local, primero para determinar la factibilidad de producción de probetas con un determinado refuerzo y, segundo, para obtener los valores de la mayor fracción volumétrica utilizable en compuestos. Dentro de los hilos se tiene el fino y el grueso, cuyos diámetros aproximados son de 0,9 y 1,5 mm. Los tejidos, en cambio, pueden encontrarse en las versiones fino, normal y grueso, denominados así por la cantidad de hilos presentes en una determinada longitud. Seguidamente, se elaboraron probetas con las dos mayores fracciones volumétricas que fueron posibles incorporar al compuesto. Con refuerzo longitudinal, las fracciones resultaron de 0,23 y 0,39 para tracción y flexión, y para el refuerzo con tejido resultaron de 0,28 y 0,34 para tracción y 0,26 y 0,30 para flexión. Cabe mencionar que la matriz de poliéster está constituida por: resina, 10% estireno, 0,5% octoato de cobalto y 1% de MEKP.



El refuerzo con tejido, se puede orientar a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la horizontal por lo que se decidió trabajar con ambas orientaciones por separado y luego unir las en un mismo compuesto alternado. Además, aprovechando la configuración alternada se decidió investigar el efecto de desarrollar diferentes curados: el primero a temperatura ambiente durante 15 días, el segundo a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  durante 16 horas, y el tercero a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Posteriormente, todas las probetas se caracterizaron mecánicamente mediante ensayos de tracción y flexión para determinar cual entre las dos fracciones volumétricas establecidas previamente para cada refuerzo ofrece mayor resistencia. Para el refuerzo longitudinal la fracción fue de 0,39 para probetas de tracción y flexión, y para el refuerzo con tejido la fracción fue de 0,34 para probetas de tracción y 0,30 para probetas de flexión. A continuación, con los compuestos que mostraron el mejor comportamiento a tracción y flexión se experimentó retirando el estireno como elemento constitutivo de la matriz. De igual manera, estas nuevas probetas fueron caracterizadas mecánicamente a tracción y flexión para determinar si las propiedades se incrementaban o disminuían. El resultado fue un incremento en la rigidez de los compuestos manteniendo la resistencia máxima, tanto a tracción como a flexión. Con los datos obtenidos se determinó la configuración con la mejor combinación de propiedades, la cual resultó ser con refuerzo alternado, sin estireno y curado a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  durante 16 horas. Esta configuración sirvió para elaborar probetas de impacto variando la fracción volumétrica hasta obtener la máxima de 0,26 y ensayarlas mecánicamente mediante caída de dardo.

En cuanto a la facilidad de fabricación, se determinó que el tejido de cabuya es más adecuado de utilizar que el hilo, ya que se aplica mediante capas que cubren toda la superficie del molde. Esto permite obtener un compuesto con refuerzo distribuido más uniformemente y menor tiempo de procesado. Los hilos, en cambio, requieren de un mayor trabajo para ser colocados dentro de la matriz y su distribución es menos uniforme, pero se puede introducir mayor cantidad de refuerzo alcanzando mayores fracciones volumétricas.

Dentro de los resultados más importantes se tiene que el compuesto con refuerzo longitudinal y fracción de 0,39 es el que muestra la mayor resistencia a la tracción con un valor de 74MPa, que representa un incremento con respecto a la matriz poliéster de 159%, pero la rigidez es únicamente de 4025MPa. Luego se tiene al compuesto con refuerzo tejido a 0° sin estireno en la matriz con fracción de 0,34; el cual alcanza un valor de 67 MPa, que representa un incremento del 136% y una rigidez de 5305 MPa. Los valores de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de la resina poliéster son de 28 y 1492 MPa, respectivamente. La diferencia entre los compuestos con refuerzos longitudinales y tejidos es que los primeros presentan resistencia unidireccional mientras que los segundos bidireccional, por lo que se concluyó que es mejor trabajar con refuerzo tejido. Ahora, el compuesto con refuerzo alternado es un material cuasi-isotrópico y presenta propiedades elevadas, por lo que esta configuración resultó como la mejor opción. Su fracción volumétrica es de 0,34, su resistencia a la tracción es de 60 MPa, representando un incremento de 111% respecto a la matriz, y con una rigidez de 6508 MPa. Se debe tomar en cuenta que este último compuesto fue desarrollado sin estireno en la matriz y con curado a temperatura de 40°C durante 16 horas. Las curvas esfuerzo-deformación de todas las configuraciones son del tipo lineal, lo que evidencia un comportamiento esencialmente frágil.

En cuanto a los ensayos de flexión, se tiene que el compuesto con las mejores propiedades es el que posee refuerzo alternado con fracción de 0,30; el cual muestra un valor de esfuerzo máximo a la flexión de 76 MPa que representa un incremento de 34% respecto a la matriz y una rigidez de 4434 MPa. Cabe mencionar que este compuesto fue elaborado sin estireno en la matriz y con curado a temperatura de 40°C durante 16 horas. Los valores de esfuerzo máximo a flexión y módulo del poliéster son 56 y 1867 MPa, respectivamente. Los últimos ensayos realizados fueron los de impacto a la configuración con la mejor combinación de propiedades, esta resultó ser la A.16h (alternado sin estireno con curado a temperatura de 40° durante 16 horas).La energía de impacto absorbida fue de 0,15 J, incrementando las propiedades de la matriz en 114%. La energía absorbida por la matriz es de 0,07 J. Es importante indicar que la fracción volumétrica en este caso fue de 0,26.

Finalmente, en el marco de este proyecto se fabricó un prototipo con la mejor configuración. Para esto, se ejecutó un análisis funcional del material, lo cual permitió reconocer las fortalezas y debilidades del mismo. Seguidamente se plantearon diferentes opciones de productos a realizarse. Esto estuvo acorde a los resultados obtenidos en el análisis de caracterización mecánica del material. Se compararon las diferentes alternativas mediante el método ordinal de criterios ponderados para determinar el producto más adecuado, que resultó ser un mostrador de vinos. Este prototipo se fabricó en base a un tablero con espesor de 5 mm, ya que ofrece la mejor combinación de costo y estabilidad. Posee una capacidad de 5 unidades con la posibilidad de apilarse para el almacenamiento de un mayor número de botellas. Además, los orificios para el pico y la base de las botellas están dispuestos de tal forma que ofrecen una inclinación de  $8,5^\circ$  para asegurar el contacto entre el líquido y el corcho en cualquiera de las dos posiciones de funcionamiento, horizontal y vertical. El costo total de fabricación del producto es de 59,80 dólares americanos, consiguiéndose una disminución del 34% respecto al costo del medio que es de 90 dólares americanos. De esta manera, se consigue ofrecer al mercado un producto de buenas propiedades mecánicas, excelente apariencia física, de aspecto natural y a menor costo de fabricación.

## PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se obtienen materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya formulados variando la fracción volumétrica, configuración del refuerzo y tiempo de curado. Se determinó el compuesto con la mejor combinación de propiedades, con el cual se elaboró un prototipo de un producto existente en el mercado y se evaluó su desempeño. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto PIC-08-493 Desarrollo de Nuevos Materiales para Aplicaciones Estructurales e Industriales, auspiciado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT).

Existen varias características importantes del compuesto estudiado y que deben ser destacadas, ya que representan ventajas en comparación con trabajos realizados anteriormente. Entre éstas se encuentra la facilidad de fabricación del material, debido a que el hilo y el tejido están disponibles en el mercado local y no se necesita de un procesamiento adicional para introducirlos como refuerzo, a diferencia de otras fibras como la de coco y la de abacá. Otra característica importante es la gran estética del refuerzo, puesto que la fibra comercializada ofrece gran variedad de hilos y tejidos en cuanto a colores y tamaños. La uniformidad y consistencia de los tejidos es elevada, por lo que puede ser orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  por separado o en un mismo compuesto como tejido alternado. Este hecho resulta de gran importancia para conseguir resistencia mecánica en varias direcciones, obteniéndose un material cuasi-isotrópico. Por ende, la fibra de cabuya será de gran utilidad dentro de un material compuesto.

En el primer capítulo se realiza una revisión de bibliografía con temas afines a este proyecto de investigación. Se presenta la caracterización de los tejidos e hilos de cabuya presentes en el mercado local, características y propiedades de los materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales, así como su comportamiento y variables de procesamiento por estratificación. Finalmente, se listan los objetivos y alcance establecidos para el desarrollo del presente trabajo.

En el segundo capítulo se presenta la metodología experimental, la cual consta de diferentes partes que son: las características de los materiales empleados para la obtención de los compuestos y los equipos utilizados, describiendo su uso y especificaciones. A continuación, se presentan los ensayos preliminares en donde se definen las diferentes configuraciones con respecto a la máxima fracción volumétrica de refuerzo. Asimismo, se presenta la caracterización de la fibra de cabuya en cuanto a hilo y tejido. Seguidamente, se encuentra el procedimiento experimental y la caracterización mecánica determinando y analizando la mejor configuración del material compuesto. Finalmente, se realiza la obtención y evaluación del prototipo que reemplazará a un producto existente en el mercado.

En el tercer capítulo se exponen y analizan resultados de los ensayos realizados a tracción y flexión que son los que permiten determinar la mejor configuración de refuerzo y mejor combinación de propiedades. Seguidamente, se muestran los resultados de impacto obtenidos mediante caída de dardo desarrollando una comparación de energía absorbida con probetas de resina poliéster. Conjuntamente con el análisis se discuten los resultados encontrados enfatizando los puntos de selección y determinación del mejor material.

En el cuarto y último capítulo se dan a conocer las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente proyecto y el cumplimiento de los objetivos planteados en base a las propiedades mecánicas obtenidas en el proceso experimental y los resultados analizados en el capítulo anterior, así como también las respectivas recomendaciones que deben tomarse en cuenta en la utilización del material.

Finalmente, se presentan los diferentes anexos desarrollados en el presente estudio. Se encuentra el ensayo de tracción al tejido de cabuya en las direcciones longitudinal y perpendicular, el cuadro de datos producto del ensayo de impacto, el método de análisis comparativo ANOVA, el proceso de elaboración de probetas, la ficha técnica del poliéster y los planos del prototipo. Toda esta información es un excelente complemento dentro del proyecto.

# **CAPÍTULO 1**

## **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En este primer capítulo se realiza una revisión de bibliografía con temas afines a este proyecto de investigación. Se presenta la caracterización dimensional y mecánica de los tejidos e hilos de cabuya, características y propiedades de los materiales compuestos de matriz termoestable, así como su comportamiento y variables de procesamiento por estratificación, tomando en cuenta las variables del curado. Finalmente, se listan los objetivos y alcance establecidos para el desarrollo del presente trabajo.

### **1.1. FIBRA, HILOS Y TEJIDO DE CABUYA**

Las fibras naturales, son estructuras filamentosas de origen vegetal, animal y mineral que, por sus características físicas y químicas, tienen aplicaciones muy diversas. Su aprovechamiento se ha evidenciado desde épocas tan antiguas como la humanidad misma. Las plantas productoras de fibras revisten gran importancia, después de las plantas alimenticias, por la influencia social y económica que representan para el ser humano. Muchas de estas plantas han sido usadas por el hombre para la fabricación de tejidos e hilos. Las fibras se han obtenido a partir de raíces, tallos, hojas, frutos y semillas.

Uno de los problemas ambientales que se observa actualmente es la casi nula utilización de residuos agroindustriales como el bagazo de caña, tamo de arroz, residuos de cosechas de cereales, raquis de palma africana, aserrín, subproductos del desfibrado de plantas como la cabuya, abacá, entre otros. Todos estos materiales en su mayoría se combustionan para generar calor, lo cual al final produce gases y provoca contaminación, mas no son incluidos en elaboración de materiales de nueva generación por falta de tecnología apropiada.

Las fibras, que han sido usadas en beneficio de la humanidad, actualmente están recuperando el espacio perdido debido a la aparición del plástico y fibras sintéticas. Esto ocurre debido a que son insumos ventajosos en sostenibilidad y protección del ambiente, sobre todo por sus características biodegradables. Precisamente los intereses o preferencias de la sociedad moderna están creando un nuevo concepto de mercado global, con énfasis en la mitigación del deterioro del planeta, y en la innovación de tecnologías de cultivo, procesamiento y aplicación de las fibras. Uno de los requisitos actuales para la competitividad empresarial es la producción amigable con el medio ambiente [1]. Todos los productos hechos a base de fibras pueden ofrecer propiedades de gran comodidad y también salud; son amigables con el ambiente, condición de calidad que será demanda en los próximos años, pueden ser etiquetados como “naturales”, lo cual es la clave para el éxito en el mercado [2].

Actualmente, existe una creciente demanda mundial de fibras naturales gracias a la conciencia que se ha ido tomando frente al enorme impacto que las fibras sintéticas ejercen sobre el planeta, pues se calcula que estos filamentos tardan más de 500 años en descomponerse. Esto representa una gran oportunidad para el potencial que el Ecuador tiene en este campo, ya que en su territorio se han registrado cerca de 25 especies de plantas vasculares. De esta manera, se consigue el reemplazo de materiales importados con locales naturales, lo cual es una vía para incrementar la competitividad de los productos ecuatorianos.

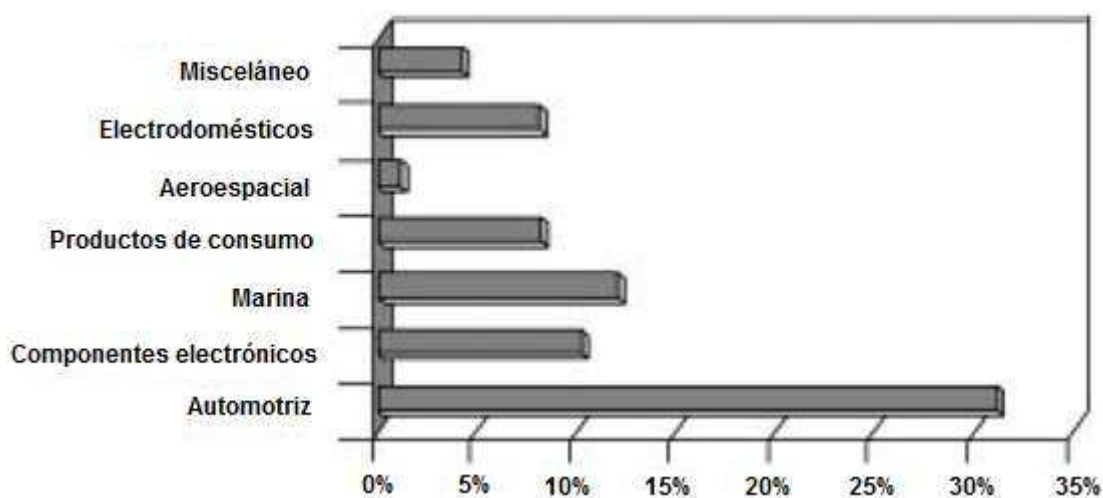


Figura 1.1. Uso de fibras naturales en la industria automotriz y otros sectores. [33]

### 1.1.1 FIBRA DE CABUYA

La cabuya es una planta nativa del Ecuador que se encuentra a lo largo del callejón interandino generalmente formando linderos [3]. Esta fibra es extraída de la hoja de la cabuya (*Furcraea Andina*). Es una planta que crece en forma silvestre o cultivada en los valles y laderas de los Andes, la misma que pertenece a la familia de las Agaváceas. Está ampliamente distribuida en la sierra del Ecuador. Se cultiva en los valles y en las estribaciones de la cordillera para la obtención de su fibra, así como también se la siembra como cerca viva. Se trata de una planta arrosetada que alcanza hasta 1,5 metros de altura en su parte vegetativa y si se incluye la estructura reproductora, puede alcanzar hasta los 15 metros [1].



Figura 1.2. Planta y fibra de cabuya (*Furcraea Andina*).

#### 1.1.1.1. Propiedades y Aplicaciones de la Fibra de Cabuya

Las fibras naturales tienen una buena resistencia mecánica, en especial la cabuya, que además es liviana y tiene una densidad de  $1,3 \text{ g/cm}^3$  [4]. Esto las hace atractivas para diferentes industrias, ya que se puede obtener un interesante ahorro de energía debido a su textura liviana combinada con resistencia a la



tracción. La gran resistencia de la fibra de cabuya obedece especialmente a sus propiedades mecánicas, que se observan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características mecánicas de diferentes fibras naturales y sintéticas. [8] [12]

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación a la fractura (%)	Absorción de la humedad (%)
<b>Cabuya</b>	1,3	305,15	7,5	4,96	---
<b>Yute</b>	1,3	393 - 773	26,5	1,5 - 1,8	12
<b>Coco</b>	1,2	175 - 220	4 - 6	15 - 30	10
<b>Abacá</b>	1,3	400 - 1289	45	2,7	8 - 10
<b>Sisal</b>	1,5	511 - 635	9,4 - 22,0	2,0 - 2,5	---
<b>Algodón</b>	1,5	393 - 773	27,6	7 - 8	8 - 25
<b>Ramio</b>	1,5	400 - 938	61,4 - 128	3,6 - 3,8	12 - 17
<b>Lino</b>	1,5	345 - 1035	27,6	2,7 - 3,2	7
<b>Cáñamo</b>	1,4	690	35	1,6	8
<b>Vidrio – S</b>	2,5	2000 - 3500	70	2,5	---
<b>Vidrio – E</b>	2,5	4570	86	2,8	---
<b>Aramida</b>	1,4	3000 - 3150	63 - 67	3,3 - 3,7	---
<b>Carbono</b>	1,4	4000	230 - 240	1,4 - 1,8	---

Para complementar las propiedades mecánicas mostradas anteriormente, en la Tabla 1.2 se presenta la composición química de las diferentes fibras naturales.

Tabla 1.2. Composición química de diferentes fibras naturales. [6] [8]

Fibra	Celulosa (% peso)	Hemicelulosa (% peso)	Lignina (% peso)	Pentosas (% peso)
<b>Cabuya</b>	62,7	---	15,5	17,7
<b>Yute</b>	61 - 71	13 - 20	8,1 - 13	---
<b>Coco</b>	32 - 43	0,15 - 0,25	40 - 45	---
<b>Abacá</b>	63 - 70	20 - 21	5 - 6	---
<b>Sisal</b>	67 - 78	10 - 14	18 - 14	---
<b>Banana</b>	63 - 64	10	5	---
<b>Algodón</b>	82 - 93	3 - 6	---	---
<b>Bambú</b>	35 - 61	15	27 - 32	---
<b>Kenaf</b>	45 - 57	21	8 - 13	---
<b>Ramio</b>	68 - 76	13 - 16	0,6 - 0,7	---
<b>Formio</b>	71,3	---	---	---
<b>Lino</b>	71,2	18 - 20	2,2	---
<b>Cáñamo</b>	70 - 75	17 - 22	3,7 - 5,7	---

La fibra de cabuya no solo es comercializada por sus buenas propiedades mecánicas, sino también por el aspecto agradable que ofrece a la vista del ser humano. Su color, textura natural y otra serie de características físicas son de gran interés en el mercado local. Estas características se pueden apreciar en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Características físicas de la fibra de cabuya. [6]

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Longitud	80 a 120 cm
Color	Habano
Brillo	Opaco
Textura	Dura
Absorción color	Superficial
Absorción humedad	Mala
Punto de fusión	No se funde
Efecto ante los álcalis	Resistente
Efectos ante los ácidos	Mala
Resistencia a la luz solar	Regular
Efecto de los oxidantes	Variable

La fibra de cabuya sería entonces una buena opción para la fabricación de materiales compuestos, debido a que sus buenas propiedades mecánicas y su alto porcentaje de celulosa contribuirían a mejorar la resistencia mecánica del poliéster, que es la matriz termoestable más empleada en el Ecuador. La cabuya está clasificada como fibra dura y debido a su origen natural se utiliza principalmente en cordelería y la fabricación de sogas. Dentro de nuevas tendencias se usa para la elaboración de papel, filtros, colchones, tapetes y tapicería. Se usa cada vez más para reforzar materiales compuestos de plástico, en particular para partes de automóviles. Los productos secundarios de la extracción de la planta (penco) se pueden utilizar para producir biogás, ingredientes farmacéuticos y materiales para construcción [5].

Desde hace cientos de años se han aprovechado sus hojas para obtener de ellas la fibra textil debido a su resistencia, durabilidad y consistencia áspera. Además,

en tumbas aborígenes se han encontrado mochilas, cordeles y telas de uso funerario elaborados con fique [6].



Figura 1.3. Algunas aplicaciones de la fibra de cabuya.

#### 1.1.1.2. Diferencias entre Fibras de Cabuya y Yute

Las fibras de cabuya y yute presentan propiedades y apariencia muy similares. Su color es abano en estado natural por lo que suelen confundirse entre sí en el mercado, incluso en algunas fuentes bibliográficas se las menciona como sinónimos. Por esta razón se deben tomar en cuenta ciertos factores

dimensionales para evitar confundirlas al momento de la adquisición y uso. En la Tabla 1.4 se mencionan algunas diferencias entre fibras de cabuya y yute.

Tabla 1.4. Diferencias entre fibra de cabuya y yute. [1]

<b>Fibra de Cabuya</b>	<b>Fibra de Yute</b>
Nombre científico: <i>Furcraea Andina</i>	Nombre científico: <i>Corchorus Capsularis</i>
Familia: Agaváceas	Familia: Malváceas
Cultivada en región interandina	Cultivada en región tropical
Se extrae de la hoja	Se extrae del tallo
Longitud entre 1,5 y 2 metros	Longitud entre 3,5 y 4 metros
Diámetro entre 130 y 258 micras	Diámetro entre 63 y 85 micras

Como se puede apreciar, las diferencias morfológicas entre las fibras de cabuya y yute se basan principalmente en sus dimensiones. La fibra de cabuya es más gruesa y de menor longitud que la fibra de yute. En cuanto a apariencia, es muy complicado tener una diferencia, ya que ambas adquieren un aspecto blanquecino luego de los tratamientos realizados de lavado y posterior secado.

### **1.1.2 HILO DE CABUYA**

En el proceso industrial de hilatura de la cabuya acontecen varios subprocesos que transforman la materia prima en bruto a producto final. Es importante contar con materia prima de óptima calidad. Básicamente se requiere que la cabuya que ya ha sido desfibrada, lavada y secada sea de una longitud aproximada de 1,5 metros, que no contenga enredos ni polvo, que la humedad relativa máxima sea de 14% y que muestre un color crema o ligeramente amarillo.

#### **Proceso de Fabricación del Hilo de Cabuya**

El proceso de fabricación del hilo de cabuya está conformado de varios subprocesos, que deben ser llevados a cabo de la manera adecuada para la obtención de un hilo de calidad. Todo el proceso posee una secuencia establecida y bien definida. Para una mejor apreciación, en la Figura 1.4 se esquematiza el proceso de transformación de la fibra de cabuya en producto terminado y listo para la distribución.

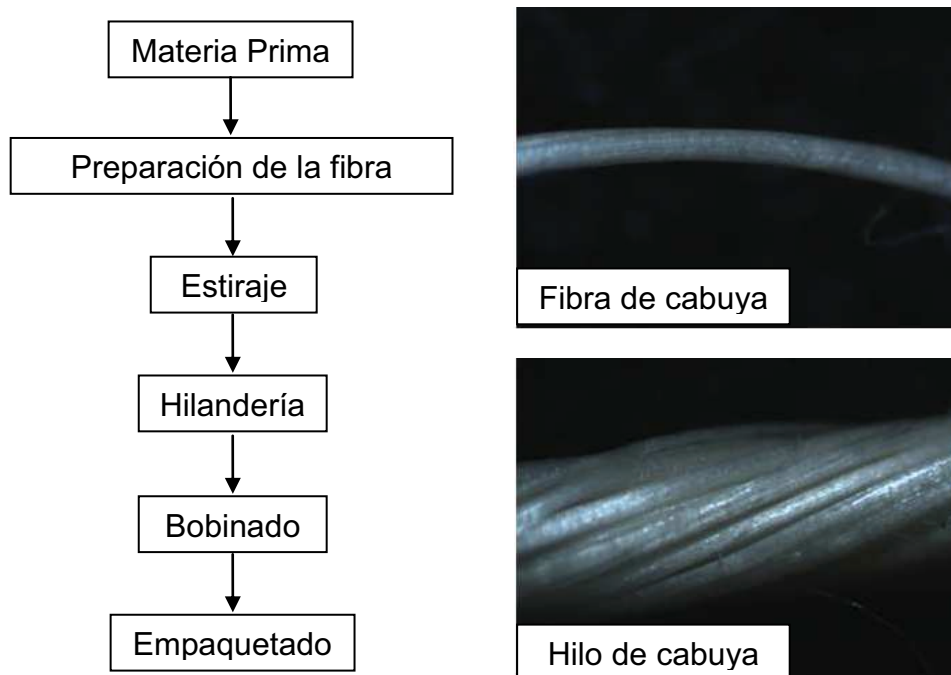


Figura 1.4. Esquema del proceso de hilado.

Dentro de la preparación, la fibra la cabuya debe ser peinada. En este proceso la fibra es golpeada por una serie de aspas a gran velocidad, liberando de esta manera a la cabuya de enredos, ripio o polvo que ha quedado adherido desde el proceso de lavado. La materia prima es humedecida con una solución a base de agua y aceite en suspensión, lo cual se lleva a cabo en la máquina peinadora. Esto se hace para que la cabuya sea más dócil y para conseguir el adecuado manejo de las partículas de polvo en la atmósfera. Luego la cabuya es abierta y rastrillada, en la máquina del mismo nombre (abridora y rastrilladora) donde la fibra es transportada en una cinta sinfín y al mismo tiempo una correa con púas de acero abren y desenredan los atados que se van disponiendo. En el proceso siguiente, la cabuya peinada, rastrillada y abierta es pasada por la extendedora que, como su nombre lo indica, es una máquina donde la cabuya se extiende obteniéndose una pila de cinta ininterrumpida y uniforme la cual es apilada en un rollo circular de 1,50 m de altura.

En el siguiente paso se prepara la cabuya para su hilatura. Para esto se usa la máquina acordonadora, donde los rollos de fibra se pasan por una serie de peines de menores tamaños y más juntos con el fin de darle a cada cinta el calibre

deseado; además, en este paso se remueve cualquier nudo o enredo que haya quedado de los procesos anteriores. La cinta que ha sido preparada se retuerce aproximadamente a 1800 r.p.m., en sentido horario, obteniéndose de esta manera el hilo de cabuya, el cual es bobinado en distintos carretes. Es importante asegurar una velocidad de giro similar para todo el proceso.

Dentro de la maquinaria involucrada en el proceso de la manufactura de la fibra, reviste vital importancia el mantenimiento preventivo de las máquinas, dado que una salida de funcionamiento de alguna de ellas representa la parálisis de la línea, ya que cada subproceso procede al anterior. Si todo el proceso fue llevado a cabo sin contratiempos se logran obtener los carretes de hilo de cabuya, los cuales son empaquetados para ser despachados y comercializados.

### **1.1.3 TEJIDO DE CABUYA**

La artesanía en telar manual es el oficio en el cual, mediante el manejo de hilos flexibles de diferentes calibres se obtiene una gran variedad de tejidos. Los hilos usados para tejer deben ser procesados, para a través del entrecruzamiento ordenado, sencillo o combinado, con trama y urdimbre, desarrollar toda la gama de tejidos existentes en el mercado. Una vez que el tejido ha sido desarrollado es enrollado para continuar con los procesos de empaquetamiento y comercialización.

Existe una amplia gama de tejidos, siendo el más sencillo el tejido plano. Está formado por filamentos intercalados en donde las fibras de la trama pasan de manera regular y uniforme por encima y debajo de la urdimbre. Así, el primer hilo correspondiente a la trama pasará por encima del primer hilo de la urdimbre, debajo del segundo, encima del tercero y así sucesivamente. En la próxima columna, los hilos de trama pasarán debajo del primero de urdimbre, encima del segundo, debajo del tercero y así sucesivamente. Después se continúa con estas repeticiones de la primera secuencia en la tercera columna y por ende en todas las columnas impares. Estos tejidos tienen un mayor número de entrelazamientos por unidad de área, lo cual puede reducir la resistencia y rigidez de un material

compuesto [7]. En la Figura 1.5 se puede apreciar la estructura básica del tejido plano.

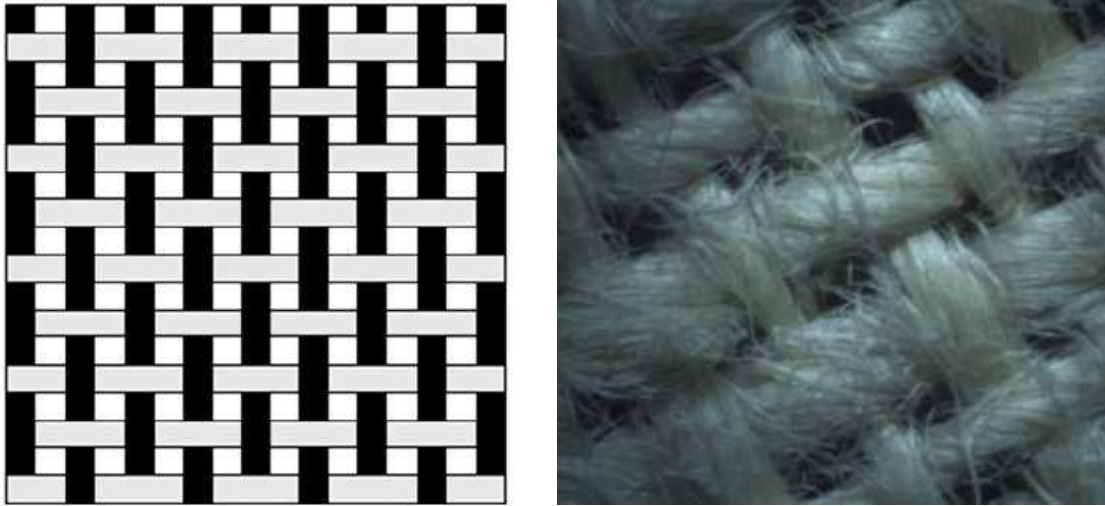


Figura 1.5. Estructura básica del tejido plano.

## **1.2. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES**

Con la finalidad de obtener materiales con combinaciones especiales de propiedades que no se encuentran en la naturaleza, nace la necesidad de unir diferentes materiales para obtener compuestos, de manera que las propiedades sean diferentes y mejores que la de sus constituyentes individuales. Los materiales compuestos están formados por medios continuos y discontinuos. El medio continuo se denomina matriz y el medio discontinuo refuerzo. Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los materiales que lo constituyen, de su distribución e interacción en la interfaz formada.

Los materiales compuestos de matriz polimérica se dividen en compuestos termoplásticos, termoestables y elastómeros. En el presente trabajo se desarrolla un material de matriz termoestable con refuerzo de fibra natural. Las resinas termoestables son normalmente isotrópicas, es decir, que las propiedades son

idénticas en todas las direcciones. Su propiedad más característica es su respuesta al calor, ya que no se funden al calentarlas pero pierden su rigidez a la temperatura de distorsión térmica, que define un límite superior efectivo para su uso en componentes estructurales. Esta característica es una desventaja puesto que los polímeros termoestables no pueden ser reciclados y reutilizados, ya que han sufrido modificaciones en su estructura química y a nivel molecular.

El término termoestable supone que el calor es necesario para el endurecimiento permanente del polímero. Sin embargo, muchos de estos polímeros pueden ser endurecidos a temperatura ambiente solamente por la reacción química llamada reticulación o curado. Una de las resinas termoestables más utilizadas es la resina poliéster insaturada, la cual posee una estructura molecular reticulada a través de uniones covalentes primarias. El tipo de enlace generado es el que impide que estos materiales puedan ser refundidos una vez que se realizó el curado.

El gráfico de la Figura 1.6 presenta en una vía esquemática una clasificación de varias matrices termoestables con respecto a las propiedades mecánicas.

PUR: Poliuretano; Cy: Policianato; PI: Poliimida; EP: Epoxy; PF: Resina fenólica; UP: Poliéster insaturado.

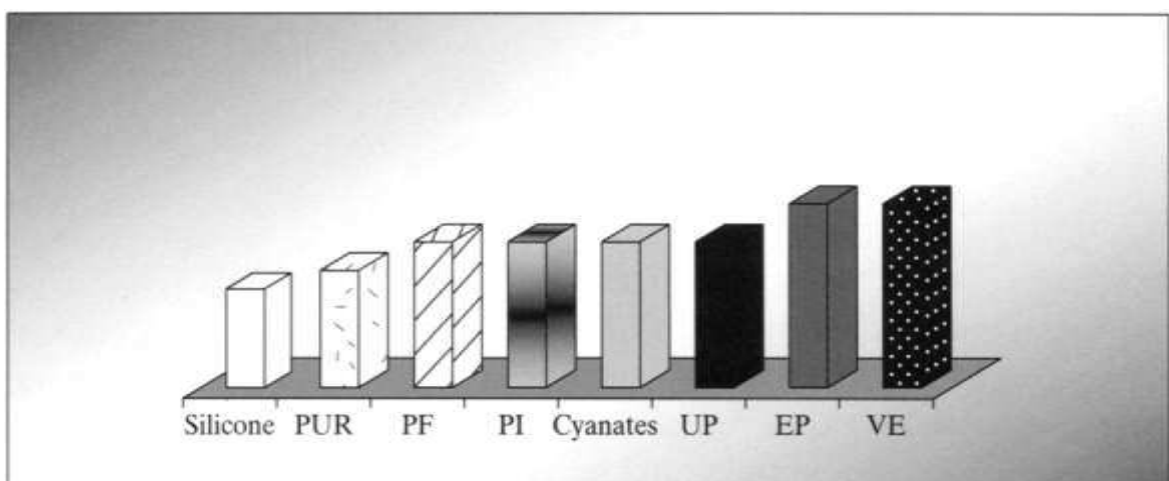


Figura 1.6. Matrices termoestables: Ejemplo de propiedades mecánicas. [32]



Desde el punto de vista estructural, los materiales compuestos más importantes son aquellos en los que la fase dispersa está formada por fibras. La mayoría de estos materiales consiguen una mejor rigidez y resistencia a la fatiga en su incorporación. El material de la matriz transmite la carga a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada distribuyéndola por todo el refuerzo.

Todas las fibras presentan características inherentes a su naturaleza, las mismas que determinan su utilidad al momento de emplearlas como refuerzo de matrices poliméricas. Estas características se encuentran relacionadas con las propiedades mecánicas que pueden aportar al material (matriz), específicamente resistencia a esfuerzos de tracción, flexión, compresión e impacto. Es importante destacar que cuando se elige una fibra como refuerzo, se deben tomar en cuenta algunos parámetros importantes que determinarán la facilidad de su producción y el rendimiento que estas presentarán. En la Tabla 1.5 se señalan algunas de las ventajas y desventajas de utilizar fibras naturales como refuerzos.

Tabla 1.5. Ventajas y desventajas de utilizar fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos. [15]

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Sostenibilidad	Baja resistencia al agua
Generan un bajo consumo de CO <sub>2</sub>	Alta absorción de agua
Son biodegradables	Baja estabilidad dimensional
Requieren un bajo consumo de energía	Pobre interfaz
No quedan residuos tóxicos al quemarlas	Dureza
Su densidad es baja	Dificultad en su procesamiento
Poseen buenas propiedades mecánicas	Calidad heterogénea
No son tóxicas ni abrasivas	Demanda y ciclos de suministro variables
Tienen bajo costo	Presentan alta flamabilidad

En general, la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales conlleva grandes beneficios para el medio ambiente. Además del beneficio directo de reducir los efectos negativos durante la fase de fabricación, también puede contribuir debido a su menor peso comparado con otros materiales como los compuestos con fibra de vidrio o los materiales metálicos; por ejemplo, en el relativo menor consumo de combustible de un vehículo de transporte debido al menor peso de carga propia [8].

Los compuestos reforzados con fibras naturales de origen vegetal se conocen como compuestos lignocelulósicos, ya que estas fibras son sustancias complejas constituidas por celulosa, lignina y pectina. Los porcentajes de cada uno de los constituyentes de las fibras influyen directamente en sus propiedades mecánicas. Estos productos son atractivos para el público debido al bajo costo del relleno y el hecho de ser menos abrasivos en comparación con refuerzos de fibras sintéticas o minerales.

Cabe señalar, que el refuerzo de fibra natural en los compuestos lignocelulósicos puede tener diferentes configuraciones en cuanto a su disposición dentro de la matriz, que resultan en un factor determinante para las características y propiedades finales que el material presentará. Dichas configuraciones pueden incluir fibra corta, larga, tejida y no tejida que darán como resultado materiales compuestos con diferentes características y propiedades mecánicas. Al colocar un arreglo de fibras largas en un solo sentido, el material presentará mayor resistencia en la dirección longitudinal de las fibras. Por otro lado, si las fibras son colocadas en capas con direcciones perpendiculares entre sí, el material se vuelve ortotrópico, pero su resistencia y tenacidad a la fractura interlaminar disminuyen, lo que limita su utilización en aplicaciones de responsabilidad estructural [7]. Estos defectos de los materiales elaborados por estratificación manual pueden reducirse al ser reforzados con tejidos de fibras, puesto que éstos presentan una conformación más estable y mejor estructurada, además de una superficie rugosa, lo cual consigue una interfaz más adecuada y permite que estas láminas se acoplen de mejor manera entre ellas [7].

La estructura y propiedades de la interfaz-matriz es determinante en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos, debido a la gran diferencia entre las propiedades elásticas de la matriz y de las fibras de refuerzo. Por ello es necesario que las fibras y la matriz estén comunicadas para que los esfuerzos que actúan sobre la matriz se transmitan a las fibras a través de la interfaz. La transferencia de esfuerzos en la interfaz entre dos fases diferentes se determina por el grado de adhesión. Una fuerte adhesión es necesaria para una transferencia eficaz de la carga y para que su distribución a través de la interfaz sea uniforme. La adhesión está directamente relacionada con las propiedades

mecánicas finales de los compuestos y depende también de la orientación, cantidad y el tamaño de las fibras en la matriz.

El arreglo u orientación de las fibras una con respecto a otra y su distribución dentro de un compuesto tiene significativa influencia en la resistencia mecánica del compuesto reforzado. De manera general, las propiedades mecánicas a tracción de las matrices poliméricas se incrementan con la inserción de fibra continua unidireccional. Sin embargo, esta configuración presenta mayor dificultad al momento del procesamiento. En flexión, compresión y corte, los compuestos formados por fibras cortas son probablemente mejores que los que están formados por fibras continuas. Esto se debe a que la orientación aleatoria indica que al menos alguna de las fibras estará correctamente alineada para resistir la deformación por este tipo de esfuerzos. Sin embargo, en la práctica, en la mayoría de compuestos se obtienen propiedades inferiores a la de la matriz, como se confirmará más adelante. Se han tabulado valores de eficiencia del refuerzo dependiendo de la orientación y la carga aplicada. Estos valores se muestran en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Eficiencia de las fibras dependiendo de su orientación. [28]

Orientación de fibras	Dirección del esfuerzo	Eficiencia del esfuerzo
Todas las fibras paralelas	Paralelo a las fibras	1
	Perpendiculares a las fibras	0
Fibras randómicas y uniformemente distribuidas en un plano específico	En cualquier dirección en el plano de las fibras	3/8

En la Figura 1.7 se muestran fotografías compuestos reforzados con fibra natural donde se evidencia su elevada estética.



Figura 1.7. Compuestos reforzados con fibras naturales: (a) poliéster-abacá-fibra de vidrio; (b) poliéster-coco-fibra de vidrio; (c) polipropileno-abacá-fibra de vidrio. [13] [27] [30]

La Tabla 1.7 se muestran algunos ejemplos de propiedades obtenidas con varias matrices para dos tipos de refuerzo de fibra de vidrio. En la Tabla 1.8, en cambio, se muestran propiedades de compuestos de fibra corta de vidrio reforzando diferentes plásticos.

Tabla 1.7. Ejemplo de propiedades para compuestos de varias matrices con dos diferentes refuerzos de fibra de vidrio. [32]

<b>30% malla de fibra de vidrio reforzando compuestos con matriz</b>	<b>UP</b>	<b>PP</b>
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	1,4	1,14
Resistencia a la tracción, MPa	100	90
Módulo elástico a tracción, GPa	6	4,5
<b>65% tela de fibra de vidrio reforzando compuestos con matriz</b>	<b>UP</b>	<b>EP</b>
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	1,9	1,9
Resistencia a la tracción, MPa	300	400
Módulo elástico a tracción, GPa	15	24

EP: epoxy; UP: poliéster insaturado; PP: polipropileno

Tabla 1.8. Ejemplos de propiedades de fibra corta de vidrio reforzando plásticos. [32]

Matrices termoplásticas					
		PP	PA	PC	PEEK
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,1 - 1,2	1,3 - 1,4	1,35 - 1,5	1,5
Resistencia a la flexión	MPa	40 - 70	100 - 160	90 - 160	150 - 180
Módulo elástico a flexión	GPa	4 - 8	5 - 9	6 - 10	9 - 12
Elongación a la rotura	%	2 - 3	4 - 7	2 - 4	2 - 3
Matrices termoplásticas					
		PP	PA	PC	PEEK
Resistencia al impacto con muesca	J/m	45 - 160	130 - 160	90 - 200	95 - 130
Temperatura de deformación a (1,8 MPa)	°C	120 - 140	230 - 260	140 - 150	290 - 315
Coefficiente de expansión térmica	10 <sup>-5</sup> /°C	2 - 3	2 - 3	2 - 4	1,5 - 3
Resistividad	ohm.cm	10 <sup>16</sup> - 10 <sup>17</sup>	10 <sup>12</sup> - 10 <sup>13</sup>	10 <sup>15</sup> - 10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup> - 10 <sup>17</sup>
Matrices termoestables					
		UP	PF	MF	EP
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	2	1,7 - 2	1,5 - 2	2
Resistencia a la flexión	MPa	60 - 100	60 - 200	35 - 180	40 - 200
Módulo elástico a flexión	GPa	7 - 11	10 - 25	11 - 20	10 - 30
Elongación a la rotura	%	1 - 3	1	1	1
Temperatura de deformación a (1,8 MPa)	°C	160 - 250	150 - 250	170 - 310	120 - 260
Coefficiente de expansión térmica	10 <sup>-5</sup> /°C	1,5 - 3	1,5 - 3	1 - 3	2 - 3
Resistividad	ohm.cm	10 <sup>12</sup>	10 <sup>10</sup> - 10 <sup>13</sup>	10 <sup>10</sup> - 10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup> - 10 <sup>15</sup>

PP: polipropileno; PA: poliimida; PC: policarbonato; PEEK: polieteretercetona  
 UP: poliéster insaturado; PF: Resina fenólica; MF: melamina EP: epoxy

En la Tabla 1.9 se presentan las propiedades mecánicas a tracción de diferentes materiales compuestos de matrices termoestables y termoplásticas reforzadas con varias fibras sintéticas y naturales, recopiladas bibliográficamente.

Tabla 1.9. Resumen de propiedades a tracción de varios materiales compuestos. [33]

Fibra/matriz	Fracción volumétrica	Esfuerzo máximo a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Malla de vidrio/poliéster	0,25 - 0,35	60 – 150	6 – 9
Sisal/poliéster	-	34 – 41	-
Yute/poliéster	45	60	7
Sisal/epoxy	-	250 – 300	8,5
Cáñamo/poliuretano	21	23	2
Cáñamo/poliuretano	19	27	3
Cáñamo alcalizado/poliuretano	20	35	3
Celulosa/PLA	0,30 (wt)	68,69	3,65
Kenaf/PLA	0,40 - 0,80	45 – 62	4,5 - 6,3
Lyocell/PLA	0,621 (wt)	100,5	5,55
Vidrio/PLA	0,39 (wt)	80	-
Lino/PLA	0,2	66	5,7
Lino/PLA	0,30 (wt)	53±3,1	4,5±0,5
Lino/PHB	0,2	64,4	6,197
Lino longitudinal/TPS	0,40 (wt)	73±3	5,9±0,6
Lino transversal/TPS	0,40 (wt)	53±5	4,5±0,5
Bambú/PP	0,2	16	2,5
Caña de azúcar/PP	0,2	16	0,6
Sisal/LDPE	0,2	16,5	0,93
Madera/PP	0,3	38	-
Cáñamo/almidón	0,5	153	-
Yute/biopol	0,25 (wt)	33,58	-
Paja/biopol	0,10 (wt)	14	1,4
Paja/biopol	0,30 (wt)	14	1,7
Celulosa/PHB	0,40 (wt)	-	6,26
Piña/PHB	0,20 (wt)	46	2,158
Bambú/PES	0,28 (wt)	85,5	8,5
Lyocell/PHBV	0,632 (wt)	108,8	2,46

En las Figuras 1.8, 1.9 y 1.10 se presentan gráficas que permiten observar el comportamiento mecánico de varios materiales compuestos para compararlos entre sí.

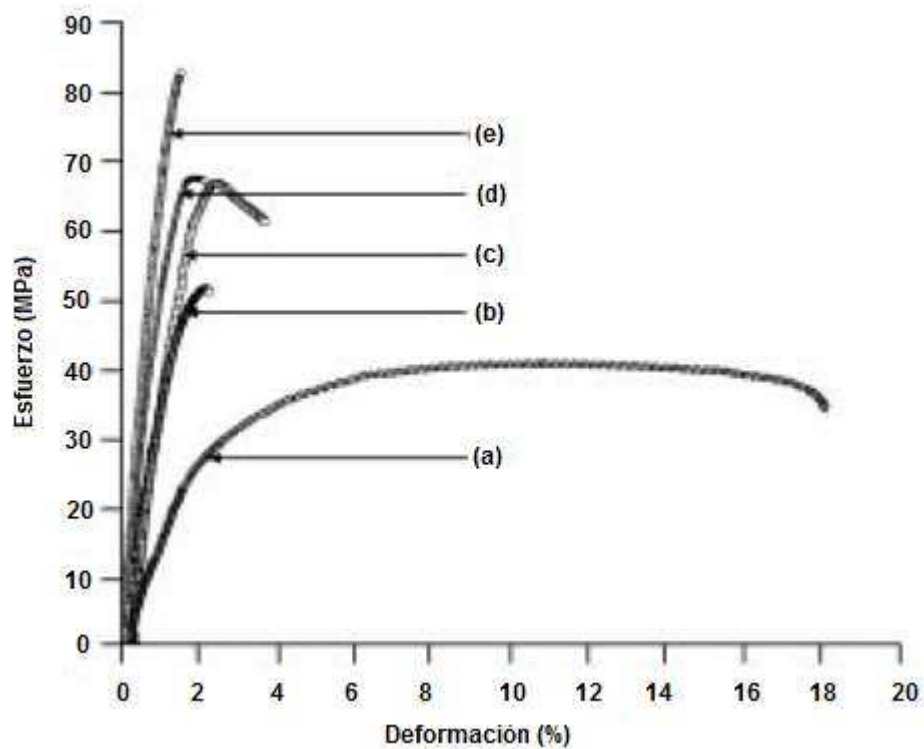


Figura 1.8. Curvas esfuerzo deformación: (a) PP (100%); (b) PP/vidrio (70/30); (c) PLA (100%); (d) PLA/RNCF; (e) PLA/vidrio (70/30). [33]

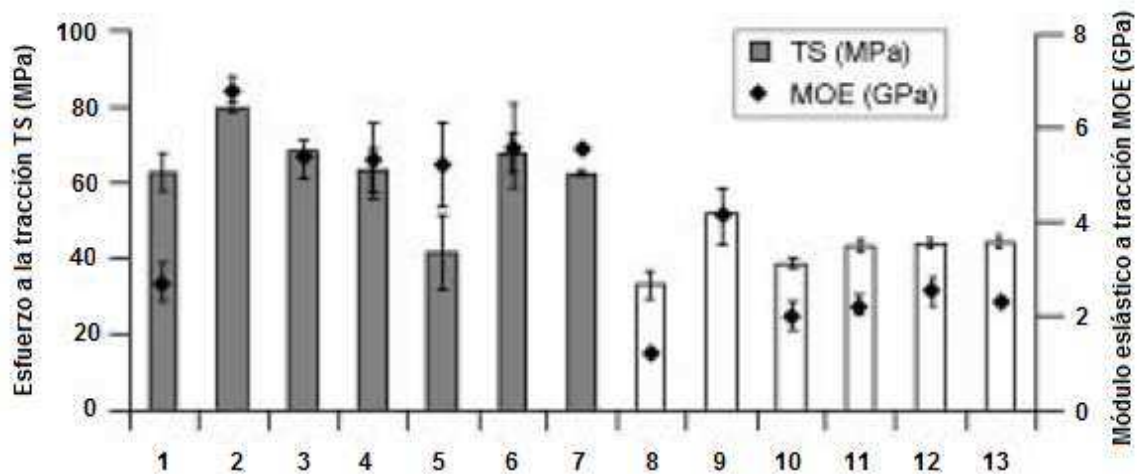


Figura 1.9. Propiedades a tracción ciertos compuestos reforzados con fibra natural: (1) PLA; (2) PLA/vidrio (70/30); (3) PLA/RNCF (70/30); (4) PLA/Madera (70/30); (5) PLA/bambú (70/30); (6) PLA/bambú tratado con NaOH (70/30); (7) PLA/bambú tratado con silano (70/30); (8) PP; (9) PP/vidrio (70/30); (10) PP/RNCF (70/30); (11) PP/bambú (70/30); (12) PP/bambú tratado con NaOH (70/30); (13) PP/bambú tratado con silano (70/30) (MOE=módulo de elasticidad). [33]

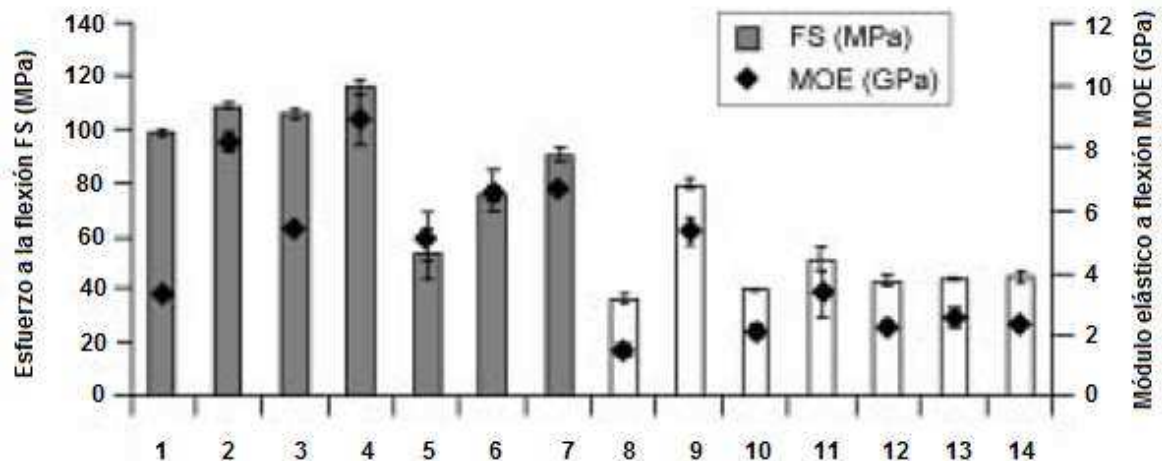


Figura 1.10. Propiedades a tracción ciertos compuestos reforzados con fibra natural: (1) PLA; (2) PLA/vidrio (70/30); (3) PLA/RNCF (70/30); (4) PLA/madera (70/30); (5) PLA/bambú (70/30); (6) PLA/bambú tratado con NaOH (70/30); (7) PLA/bambú tratado con silano (70/30); (8) PP; (9) PP/vidrio (70/30); (10) PP/RNCF (70/30); (11) PP/madera; (12) PP/bambú (70/30); (13) PP/bambú tratado con NaOH (70/30); (14) PP/bambú tratado con silano (70/30). [33]

### 1.3. PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS

Las propiedades y el comportamiento de los materiales compuestos dependen directamente de las propiedades de las partes que lo conforman. Es decir, dependen de la matriz, el refuerzo y la interfaz formada entre estos dos elementos. Cada una de estas partes determina un detalle crucial al momento de formar las propiedades globales del compuesto.

La matriz es aquella que mantiene unidos a los refuerzos, proporcionando un soporte natural, protegiéndolos del medio externo y transfiriendo las cargas hacia las fibras. Además, brinda tenacidad al compuesto. El refuerzo en cambio, es conformado por materiales resistentes, con baja densidad y de fácil producción en pequeños diámetros. Sus funciones son:

- Aumentar la resistencia a la tracción, compresión y corte.
- Aumentar el módulo de elasticidad y rigidez.
- Aumentar la temperatura de deformación por calor.



- Disminuir la contracción.
- Mejorar el comportamiento en fluencia.
- Mejorar la resistencia al impacto.

Como se puede apreciar, el refuerzo se emplea para mejorar una o varias propiedades de la matriz según sea requerido en cada caso del diseño. La estructura y propiedades de la interfaz fibra-matriz es determinante en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos, debido a la gran diferencia entre las propiedades de la matriz y de las fibras de refuerzo.

Algunas de las ventajas de las fibras al formar parte de materiales compuestos son:

- Ambientalmente amigables tanto en el proceso, producción y desecho al final del ciclo.
- Renovables, y necesitan menor cantidad de energía de entrada por unidad de producción.
- Propiedades similares a aquellos materiales con refuerzo de fibra de vidrio.
- Mejor elasticidad que las fibras minerales.
- Menos abrasivos durante el proceso de fabricación.
- Absorben bien las vibraciones y por lo tanto el sonido.
- 2 a 3 veces más barato que trabajar con fibra de vidrio.
- Si se requiere un compuesto 100% biodegradable se pueden mezclar con bio-polímeros como almidón, lignina, hemicelulosa, caucho, etc.
- En el proceso de combustión existe menor producción de CO<sub>2</sub> y otros gases tóxicos [9].

Sin embargo, también presentan algunas desventajas:

- La calidad de las fibras es dependiente de las condiciones naturales.
- Se requieren grandes áreas de cultivo si se empieza una producción a escala.
- La capacidad hidrofílica de las fibras naturales podría afectar las propiedades, dependiendo de la aplicación.

- El enlace en la interfaz entre los polímeros y fibras naturales en estado natural es débil.

Para mitigar los efectos negativos de la interfaz se puede modificar la superficie de las fibras por medio de diferentes tratamientos que permiten mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Estos tratamientos pueden ser físicos (tratamiento plasma de baja temperatura, tratamiento de corona, mercerización y tratamiento térmico) o químicos (acetilación, benzilación, propinilación, y tratamientos con estearatos) [10].

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos en la incorporación de fibras naturales en diferentes matrices poliméricas, con la idea de usar estos datos como referencia en la formulación y evaluación de los materiales del presente proyecto. Sin embargo, cabe recalcar que estos valores solo son una guía, ya que todos los resultados pertenecen a trabajos en diferentes polímeros. En la Tabla 1.10, se muestran las propiedades mecánicas a tracción y flexión en materiales compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes fibras.

Tabla 1.10. Propiedades mecánicas promedio de tracción y flexión de compuestos de matriz poliéster reforzado con diferentes fibras. [13] [25] [27]

Tipo de material	Fibra de refuerzo	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad a tracción (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a flexión (MPa)
Poliéster	---	28,67	1492	56,62	1867
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 30 vol%	abacá	29,24	5323	47,52	2685
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 25vol%	abacá	25,76	5426	51,80	3521
Compuesto de fibra longitudinal, 35 vol%	abacá	136,95	3990	109,89	4605
Compuesto de fibra longitudinal, 25 vol%	abacá	120,34	4364	105,00	3546
Compuesto de fibra de vidrio, 15 vol%	vidrio	73,97	5330	111,05	4482,74
Fibra corta de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)					
Compuesto de fibra corta, 20 vol%	25A/75V	69,77	2770	84,02	3420
Compuesto de fibra corta, 20 vol%	50A/50V	54,35	3132	77,48	3604
Compuesto de fibra corta, 20 vol%	75A/25V	32,76	2109	81,69	3589

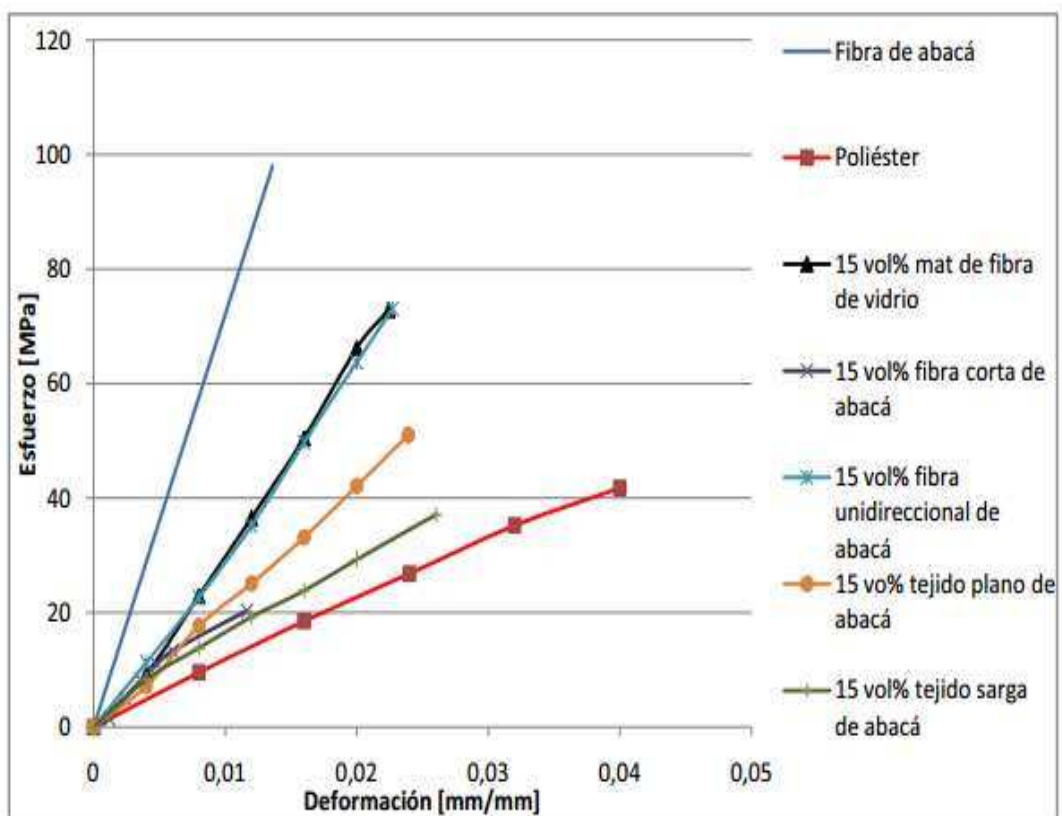
Continúa Tabla 1.10:

Tipo de material	Fibra de refuerzo	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad a tracción (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a flexión (MPa)
Fibra unidireccional de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)					
Compuesto de fibra unidireccional, 20 vol%	25A/75V	115,02	3357	116,04	5024
Compuesto de fibra unidireccional, 20 vol%	50A/50V	93,48	2457	127,74	5545
Compuesto de fibra unidireccional, 20 vol%	75A/25V	137,77	4473	126,73	5091
Tejido plano de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)					
Compuesto de tejido plano, 20 vol%	25A/75V	94,05	2941	109,13	4110
Compuesto de tejido plano, 20 vol%	50A/50V	85,37	2149	79,06	2918
Compuesto de tejido plano, 20 vol%	75A/25V	84,61	2522	79,53	3157
Tejido sarga de abacá (A) / Mat de fibra de vidrio (V)					
Compuesto de tejido sarga, 20 vol%	25A/75V	78,54	2683	80,03	3037
Compuesto de tejido sarga, 20 vol%	50A/50V	72,40	2274	70,97	2750
Compuesto de tejido sarga, 20 vol%	75A/25V	52,86	2385	68,64	2667
Fibra corta de coco (C) / Mat de fibra de vidrio (V)					
Compuesto de fibra corta, 10 vol%	100C/0V	18,72	1857	43,98	1798
Compuesto de fibra corta, 10 vol%	25C/75V	25,95	3286	63,79	2793
Compuesto de fibra corta, 10 vol%	50C/50V	35,71	3722	72,42	3042
Compuesto de fibra corta, 10 vol%	75C/25V	38,27	4232	77,56	3303
Compuesto de fibra corta, 15 vol%	100C/0V	17,19	1843	44,69	2011
Compuesto de fibra corta, 15 vol%	25C/75V	23,77	2940	63,72	3118
Compuesto de fibra corta, 15 vol%	50C/50V	38,56	3960	89,23	4095
Compuesto de fibra corta, 15 vol%	75C/25V	54,28	4987	110,32	4483

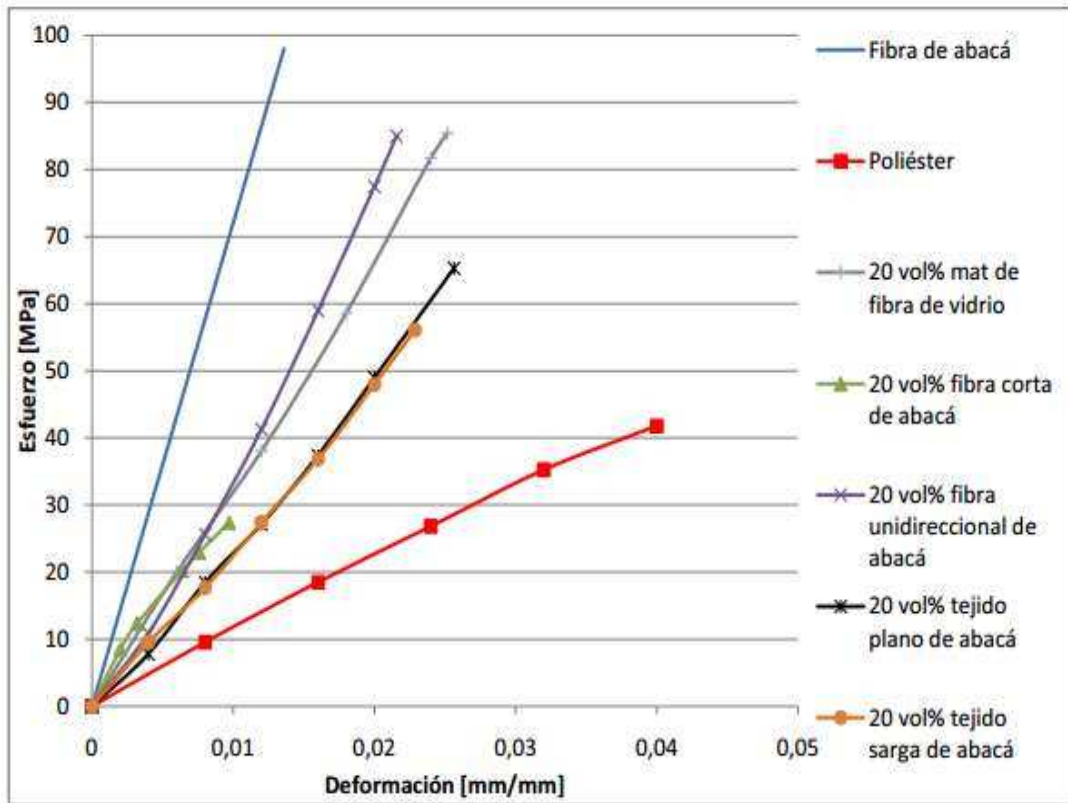
Los compuestos elaborados con fibra corta de abacá presentaron problemas de adhesión entre la matriz y el refuerzo. Al parecer no existió un adecuado anclaje de la fibra corta en la matriz, lo cual pudo provocar la presencia de discontinuidades a lo largo del material y que los esfuerzos no se distribuyeran de forma homogénea en el área transversal de la probeta, fallando el material a

cargas menores que en el caso de la resina poliéster. Sin embargo, para el caso de materiales elaborados con fibra continua hubo un incremento considerable de la resistencia a la tracción, debido a que los esfuerzos se distribuían de manera más homogénea a la largo de las fibras por su orientación. Además, para estos materiales mientras más se aumenta la fracción volumétrica de fibra en la matriz sus propiedades se incrementan hasta un límite, donde las propiedades empiezan a bajar por exceso de fibra añadida.

En la Figura 1.11 se muestran los valores de resistencia a la tracción respecto a la fracción volumétrica y la orientación de la fibra en materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio. Las curvas son del tipo lineal, evidenciando un comportamiento esencialmente frágil.



(a)



(b)

Figura 1.11. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de materiales compuestos de matriz de poliéster reforzados con distintos tipos y configuraciones de fibra: (a) 15 vol% de refuerzo; (b) 20 vol% de refuerzo. [13]

En la Figura 1.12 se presentan las curvas de esfuerzo-deformación de las formulaciones de refuerzo híbrido con fibra corta y longitudinal de abacá y fibra de vidrio en diferentes configuraciones.

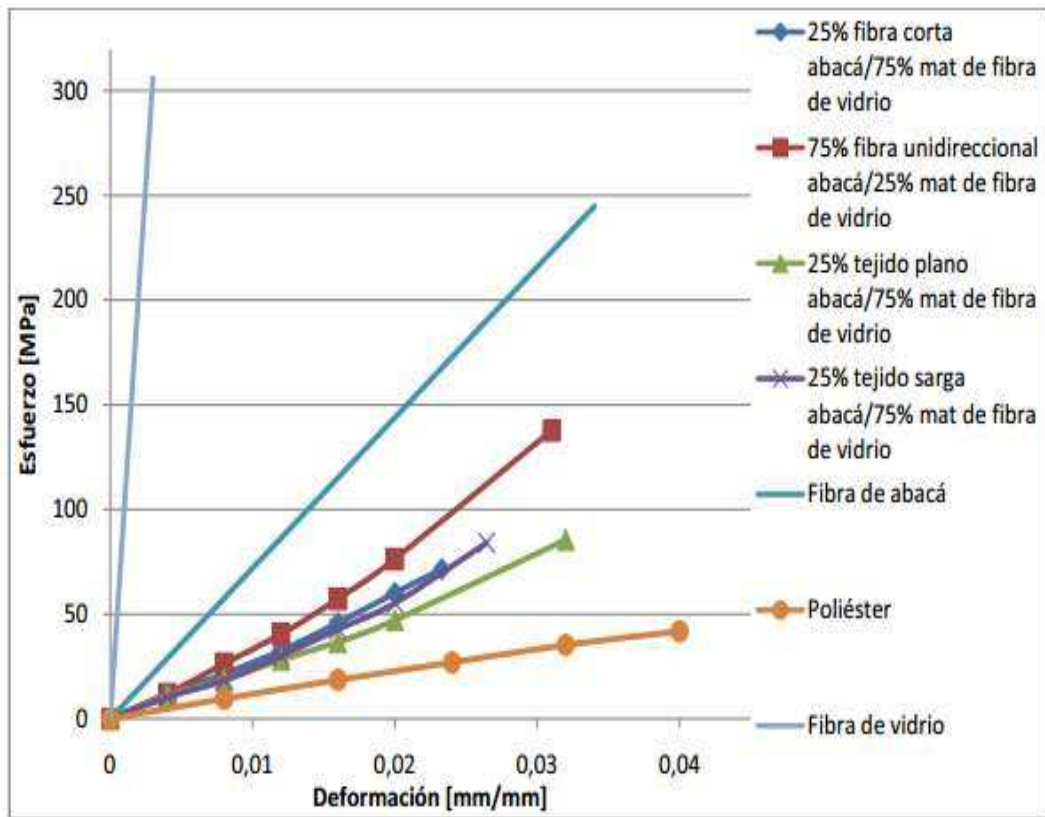


Figura 1.12. Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio. [13]

De la figura anterior se puede notar el efecto de los refuerzos híbridos en la matriz, incrementando sus propiedades mecánicas. Resalta la curva del 75% de fibra longitudinal de abacá y 25% fibra de vidrio. Se debe señalar que las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos de tracción son fundamentalmente lineales.

En la Figura 1.13 se muestra el gráfico del esfuerzo máximo específico vs. módulo de elasticidad específico, ambas referidas al ensayo de tracción, para los materiales híbridos, incluyendo la resina poliéster, los compuestos de 20 vol% de mat de fibra de vidrio y de 20 vol% de fibra continua unidireccional de abacá. Las propiedades específicas se obtienen al dividir las propiedades para la densidad.

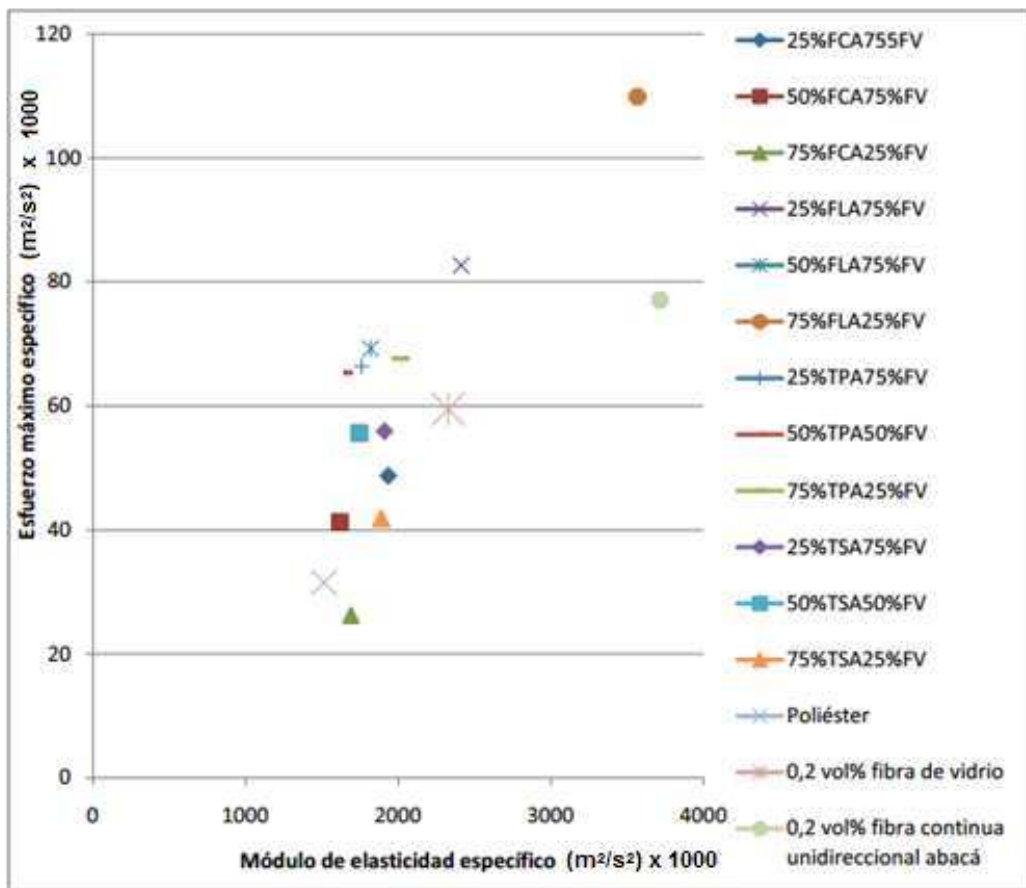


Figura 1.13. Esfuerzo máximo a la tracción específico vs. módulo de elasticidad específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos. [13]

El compuesto con 75A/25V con fibra continua unidireccional de abacá y fibra de vidrio, muestra las mejores propiedades sobre el resto de formulaciones. Sobresale también, el compuesto con el 20 vol% de fibra longitudinal de abacá. Estos materiales resaltan del resto por tener menor densidad, puesto que están conformados mayoritariamente por fibra natural que es mucho más liviana que la fibra de vidrio.

En la Figura 1.14 se muestra el gráfico del esfuerzo máximo específico a flexión vs módulo de elasticidad específico para los materiales híbridos, incluyendo la resina poliéster, los compuestos de 20 vol% de mat de fibra de vidrio y de 20 vol% de fibra continua unidireccional de abacá.

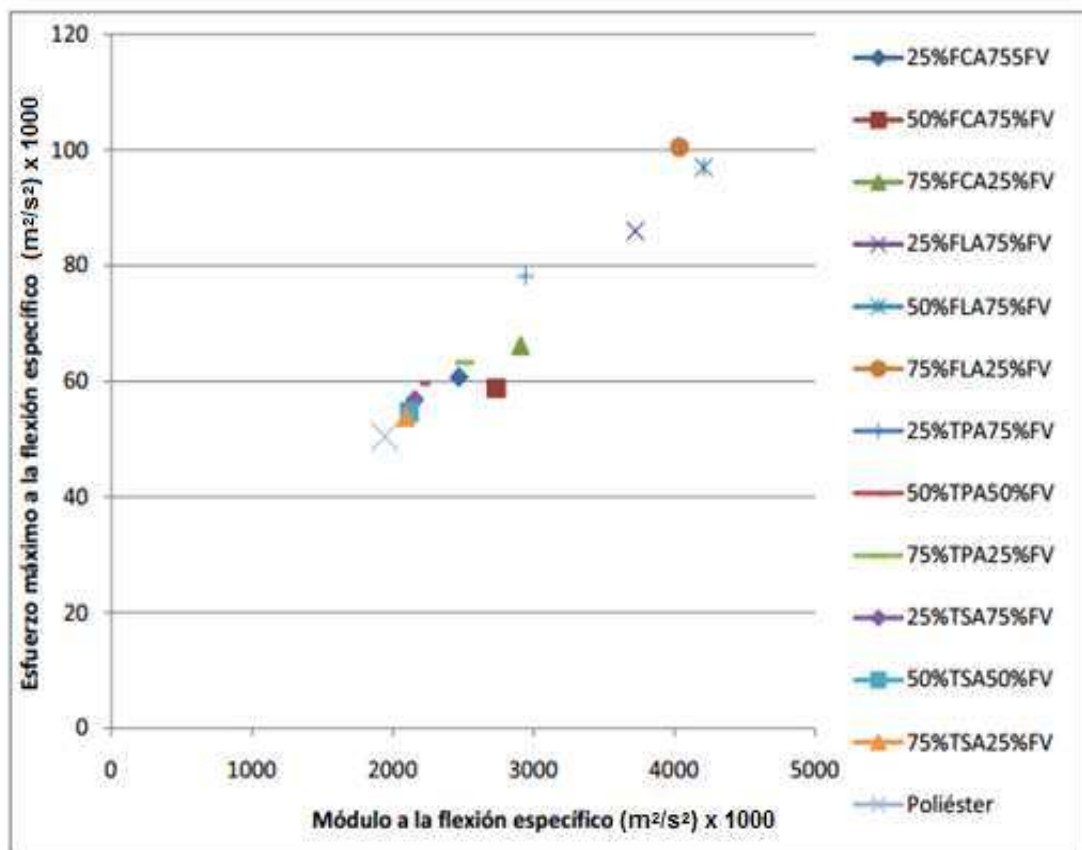
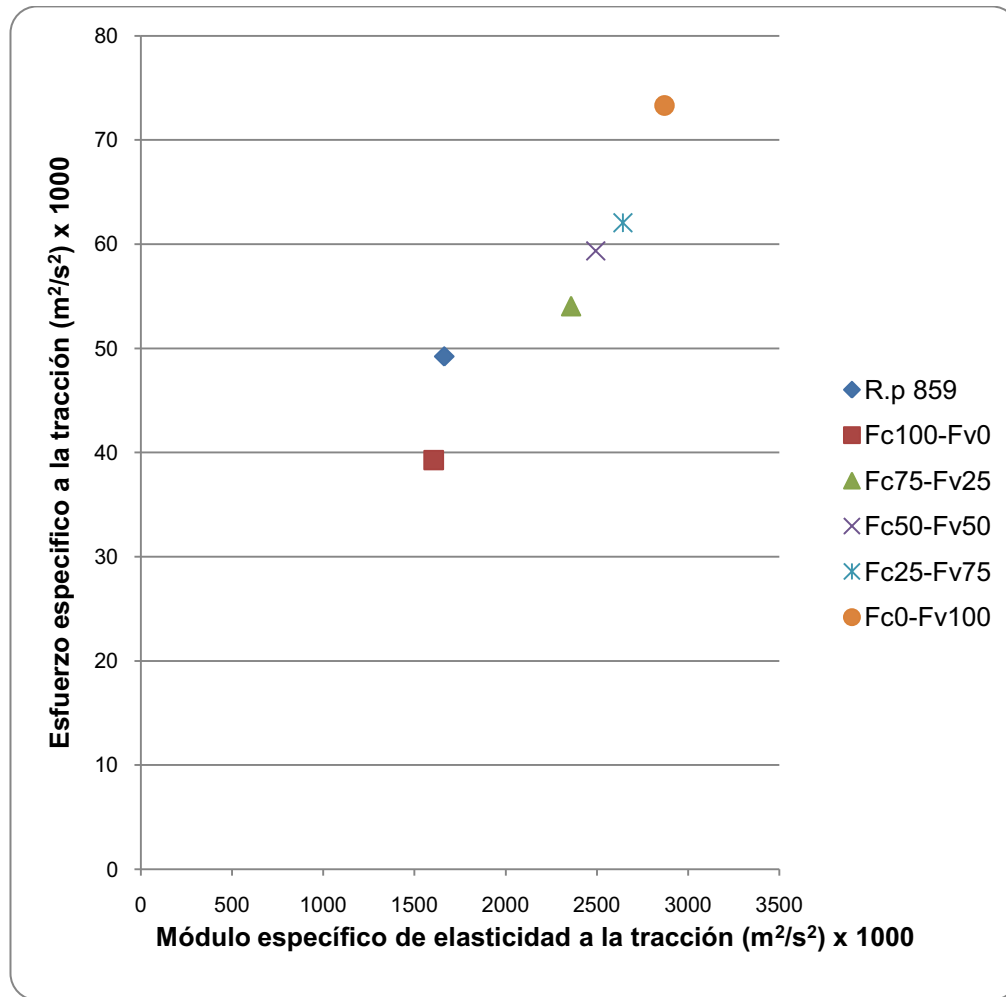


Figura 1.14. Esfuerzo máximo a flexión específico vs. módulo de elasticidad a flexión específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos. [13]

Destacan las formulaciones de fibra continua unidireccional de abacá y mat de fibra de vidrio, en especial la del 75A/25V puesto que este es más liviano, debido a la menor densidad de la fibra natural respecto de la fibra sintética de vidrio.

En la Figura 1.15 se presentan las propiedades específicas a tracción y flexión del compuesto poliéster-coco, así como también con refuerzos híbridos de fibra de coco y fibra de vidrio en dos fracciones volumétricas globales de 0,15 y 0,20. Dentro de cada refuerzo se varió el porcentaje volumétrico de fibra de vidrio y fibra de coco.

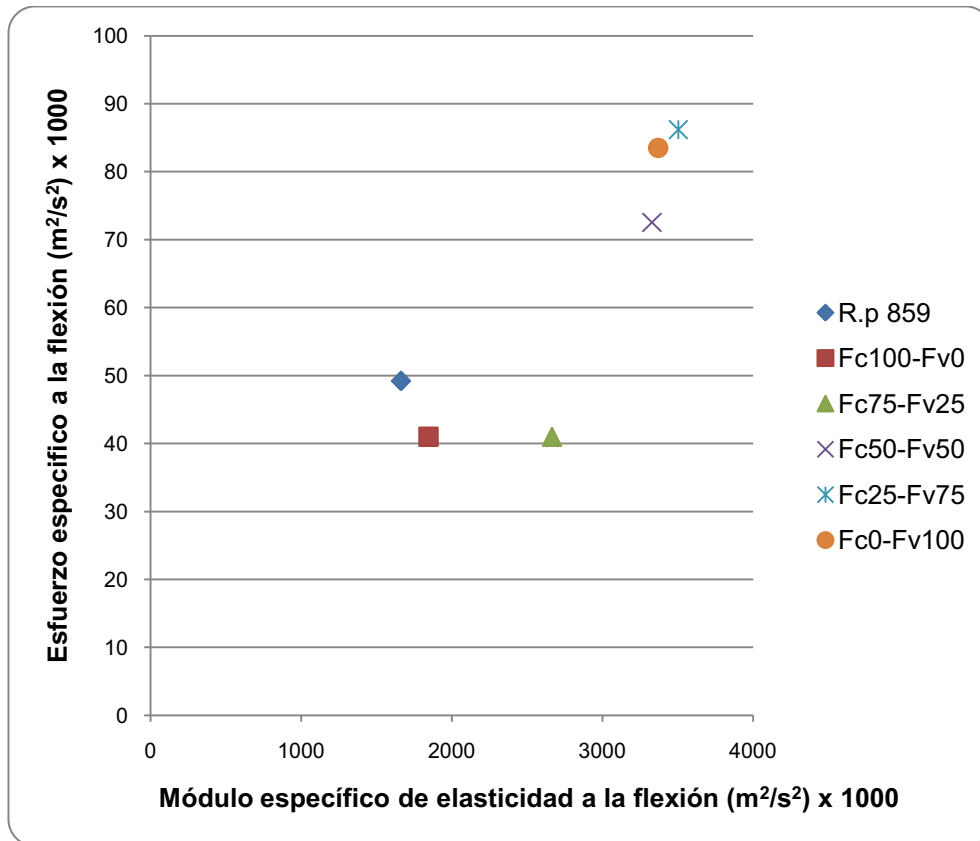




Donde R.p 859 se refiere a la resina poliéster.

Figura 1.15. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico a la tracción para compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de coco y vidrio. [27]

Se destaca la configuración Fc25-Fv75 seguida de la configuración Fc50-Fv50, sin tomar en cuenta la configuración al 100% de fibra de vidrio. Cabe señalar que la configuración Fc25-Fv75 presenta elevadas propiedades mecánicas ya que contiene mayor concentración de fibra de vidrio. Esto sin embargo es una desventaja si se considera la densidad del material. Así también, al tener una menor concentración de fibra natural hace menos atractivo al material y se desvía de los objetivos de aplicabilidad de este recurso y carácter biodegradable de los materiales.



Donde R.p 859 se refiere a la resina poliéster.

Figura 1.16. Resistencia específica a la flexión vs. módulo específico para compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de coco y vidrio. [27]

En la Tabla 1.11 se muestran la variación de las propiedades para diferentes materiales compuestos híbridos, reforzados con fibra de yute y fibra de vidrio.

Tabla 1.11. Compuestos híbridos de yute y fibra de vidrio en matrices epoxy y poliéster. [26]

Polímero	Yute (wt%)	Fibra de vidrio (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad a la tracción (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a la flexión (GPa)
Epoxy	33	0	104	15	150	15
Epoxy	18	40	157	25	445	21
Epoxy	20	30	143	23	418	21
Epoxy	14	40	238	31	624	28
Epoxy	0	68	429	41	938	37
Epoxy	0	0	59	4	127	4
Poliéster	22	0	84	12	125	8
Poliéster	10	38	200	18	229	18
Poliéster	0	69	391	39	816	33
Poliéster	0	0	37	4	69	5

Este tipo de materiales se han utilizado como elementos de bajo costo en la industria de la construcción, en silos para almacenaje de granos y en pequeños botes de pesca. De acuerdo a lo observado en la tabla anterior, la adición de 22 wt% de fibra aumenta tanto la resistencia máxima a la tracción como el módulo en más de un 100%. Sin embargo, este tipo de materiales tienden a la absorción de humedad causando serios decrementos en las propiedades (resistencia máxima a la tracción: disminución de un 24% y módulo: reducción de un 25%) cuando están expuestos a altas temperaturas y agua.

Algunas propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster obtenidos en bibliografía se presentan en las Tablas 1.12 y 1.13.

Tabla 1.12. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta y unidireccional. [34]

Fibra (wt %)	Esfuerzo a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad a la tracción (GPa)	Esfuerzo a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a la flexión (GPa)	Resistencia al impacto (KJ m <sup>-2</sup> )
Unidireccional					
Sisal (40)	129	8,5	192	7,5	98 <sup>a</sup>
Banana (40)	121	8,0	---	---	52 <sup>a</sup>
Coco (30)	45	4	56	4	44 <sup>a</sup>
Corta al azar					
Sisal (25)	34,5	1,9	86,4	---	30
Banana (25)	43,5	2,3	92	---	10
Coco (25)	14,0	1,4	31,2	---	11
Tela					
Banana-algodón	27,9 - 35,9 <sup>b</sup>	3,3	50,6 - 64 <sup>b</sup>	---	3,1 - 7,5 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Resistencia al impacto (Charpy) para 0,5 V<sub>f</sub>.

<sup>b</sup> Depende del tipo de fibra en la dirección de prueba.

Tabla 1.13. Propiedades de compuestos de matriz poliéster reforzados con yute y vidrio. [34]

Propiedades	Yute-poliéster	Vidrio-poliéster
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,25	1,45
Absorción de humedad (%) después de 24 h de remojo	0,84	0,17
Hinchazón de espesor (%) después de 24 h de remojo	0,17	0,12
Resistencia a la flexión (MPa)	60,12	138,2
Módulo elástico a la flexión (GPa)	2,97	4,02
Resistencia a la tracción (MPa)	44,25	117,4
Módulo elástico a la tracción (GPa)	2,88	6,08

Debido a la gran densidad de los metales, las propiedades específicas ciertos compuestos resultan comparables en mayor medida que las propiedades mecánicas solas. En la Tabla 1.14 se puede apreciar las propiedades específicas de ciertos materiales metálicos y varios compuestos de matriz termoestable.

Tabla 1.14. Propiedades específicas de ciertos materiales metálicos y varios compuestos. [32]

	Densidad	Esfuerzo a la tracción específico, MPa		Módulo específico a tracción, GPa
Metales & aleaciones				
		Min.	Max.	
Acero	7,8	38	231	27
Titanio	4,5	220	222	23
Aluminio	2,8	27	250	27
Magnesio	1,75	49	146	25
Vidrio				
	2,5	16	120	
Madera				
	0,4 – 0,75	12	21	13 - 27
Compuestos poliméricos				
Unidireccional CF	1,56	1154	1923	167
Unidireccional ArF	1,37	1022	1095	64
Unidireccional GF	1,9	421	421	15
SMC CF	1,5	187	233	33
SMC GF	1,8	27	158	3 - 12
Polímeros reforzados con fibra larga de vidrio				
EP LGF	1,8	50	50	9
Polímeros reforzados con fibra corta de vidrio				
EP GF & mineral	1,9	26	53	5 - 9
PEEK 30% CF	1,44	146	146	12
PEEK 30% GF	1,52	109	109	7

ArF: fibra de aramida; CF: fibra de carbono; GF: fibra de vidrio; LGF: fibra de vidrio longitudinal; UD: unidireccional.

En la Tabla 1.15 se muestra la variación de las propiedades para materiales de polietileno reforzado con fibra de abacá. Solamente se muestra un resumen de los compuestos con las mejores propiedades.

Tabla 1.15. Propiedades mecánicas de compuestos de polietileno reforzados con fibras de abacá.

[28]

<b>Tipo de material compuesto</b>	<b>Polietileno sin refuerzo</b>	<b>Fibra corta de 10 mm, 35 vol%</b>	<b>Fibra corta de 20 mm, 35 vol%</b>	<b>Fibra corta de 30 mm, 35 vol%</b>	<b>Fibra continua orientada longitudinalmente, 35 vol%</b>
<b>Fibra de refuerzo</b>	...	abacá	Abaca	abacá	abacá
<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	12	11	13	15	102
<b>Módulo de Young (MPa)</b>	93	399	366	406	1667
<b>Resistencia a la flexión (MPa)</b>	13	13	21	19	38
<b>Módulo de elasticidad a la flexión (MPa)</b>	137	107	221	252	507

Como conclusiones importantes de este estudio, la utilización de fibras cortas de 30 y 20 mm de largo produjo resultados alentadores en las pruebas, mostrando que elevan el módulo de elasticidad del material de la matriz en hasta un 500% dependiendo de la composición. Por otro lado, las fibras de 10 mm muestran un desempeño modesto sin elevar las propiedades mecánicas significativamente. A su vez, la inclusión de fibras continuas produce el mayor aporte a las propiedades mecánicas de los compuestos.

Existen también estudios de refuerzo de sisal en matrices de polietileno, donde compuestos reforzados con fibra corta presentan un incremento gradual de las propiedades a tracción respecto al aumento de la longitud de la fibra. Los valores máximos se registran en fibras de 6 mm (12,5 MPa) mientras que en fibras de 10 mm (10,2 MPa) los valores disminuyen.

En la Tabla 1.16 se puede apreciar un cuadro general de resultados de las propiedades mecánicas de compuestos híbridos de polipropileno, fibra de abacá y fibra de vidrio.

Tabla 1.16. Cuadro general de resultados de las propiedades mecánicas de compuestos híbridos de polipropileno, fibra de abacá y fibra de vidrio. [30]

No.	Configuración	Tipo del material compuesto híbrido	Fracción volumétrica del refuerzo		Fracción volumétrica de fibras [%]		Ensayo de tracción			Ensayo de flexión		
			[%]	Fibra de vidrio	Abacá	Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Módulo de trabajo promedio	Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Módulo de trabajo promedio	
1	Matriz de PP	-	-	0	0	0	26,12	1194,77	210,25	24,31	1267,28	562,94
2	FV20	-	20	100	0	0	72,90	4571,16	-	58,15	2747,20	1885,38
3	FC201002	Fibra corta 10 mm	20	75	25	75	64,06	4288,26	-	46,14	2600,60	910,63
4	FC201003	Fibra corta 10 mm	20	50	50	50	66,50	6473,00	3323,90	46,14	2726,46	902,66
5	FC201004	Fibra corta 10 mm	20	25	75	75	38,42	5924,80	3364,90	50,28	3655,42	803,32
6	FC201005	Fibra corta 10 mm	20	0	100	100	25,31	5015,17	1940,57	34,17	2424,50	647,76
7	FC202002	Fibra corta 20 mm	20	75	25	25	62,66	4830,40	-	53,99	3123,98	2276,20
8	FC202003	Fibra corta 20 mm	20	50	50	50	54,83	4704,40	-	45,97	3138,52	755,80
9	FC202004	Fibra corta 20 mm	20	25	75	75	49,35	4010,82	-	55,08	3416,60	1142,71
10	FC202005	Fibra corta 20 mm	20	0	100	100	35,27	2829,76	-	39,35	2501,98	697,89
11	FL2002	Fibra longitudinal 250 mm	20	75	25	25	108,57	9949,46	-	68,31	3614,88	2625,88
12	FL2003	Fibra longitudinal 250 mm	20	50	50	50	112,40	8790,40	-	66,16	3590,68	2115,08

Continúa Tabla 1.16:

13	FL2004	Fibra longitudinal 250 mm	20	25	75	112,01	8299,40	-	54,77	2935,20	1560,70
14	FL2005	Fibra longitudinal 250 mm	20	0	100	145,10	10183,70	-	62,77	3827,00	1167,48
15	FV25	-	25	100	0	111,52	6622,18	-	62,62	4335,36	2814,02
16	FC251002	Fibra corta 10 mm	25	75	25	70,21	5249,26	3544,12	51,23	3918,18	1165,81
17	FC251003	Fibra corta 10 mm	25	50	50	49,40	3902,96	2730,20	50,92	4660,08	3127,80
18	FC251004	Fibra corta 10 mm	25	25	75	43,54	4922,54	3124,18	60,78	4763,48	1007,55
19	FC251005	Fibra corta 10 mm	25	0	100	26,19	2654,13	2179,57	35,57	2485,65	746,46
20	FC252002	Fibra corta 20 mm	25	75	25	77,98	5224,35	-	52,92	5288,40	3626,64
21	FC252003	Fibra corta 20 mm	25	50	50	70,56	8429,43	4902,77	37,23	2508,32	759,05
22	FC252004	Fibra corta 20 mm	25	25	75	50,28	6416,65	4044,40	56,77	4272,92	1142,48
23	FC252005	Fibra corta 20 mm	25	0	100	34,58	3854,46	2660,80	45,55	3165,6	1062,63
24	FL2502	Fibra longitudinal 250 mm	25	75	25	106,62	9085,00	-	70,19	4712,20	2742,22
25	FL2503	Fibra longitudinal 250 mm	25	50	50	139,82	11096,30	15700,00	74,78	4415,18	3159,94
26	FL2504	Fibra longitudinal 250 mm	25	25	75	141,20	11101,00	-	66,15	4005,06	2070,24
27	FL2505	Fibra longitudinal 250 mm	25	0	100	136,30	10635,40	-	83,38	7118,00	4364,04

En la tabla anterior se observa una columna que muestra la codificación de todas las diferentes configuraciones de compuestos híbridos de polipropileno, fibra de abacá y fibra de vidrio. Esta codificación se explica de la siguiente manera: (i) las dos primeras letras indican el tipo de configuración, donde FC=fibra corta y FL=fibra longitudinal; (ii) los dos números siguientes indican la fracción volumétrica de fibra, donde 20=0,20 y 25=0,25; (iii) para el caso de fibra corta, los dos siguientes números indican la longitud de la fibra, donde 10=10 mm, y 20=20mm; (iv) los dos últimos números indican la relación de fibra de abacá y fibra de vidrio en conjunto como refuerzo, donde 02=25%abacá/75%vidrio, 03=50%abacá/50%vidrio, 04=75%abacá/25%vidrio, 05=100%abacá/0%vidrio. De esta manera se codifican las diferentes configuraciones.

La configuración del compuesto híbrido que presentó mayor resistencia a la tracción fue el de 0,25 de fracción volumétrica con una configuración de refuerzo híbrido de: 50% de fibra continua longitudinal de abacá y 50% de fibra de vidrio tipo mat (FLA50FV50). El esfuerzo máximo a tracción de este material fue de 145 MPa, aproximadamente 5 veces mayor que la matriz (26,12 MPa). De manera similar, el módulo de elasticidad de este nuevo material fue de 11096 MPa, aproximadamente 9 veces mayor al que presentó la matriz de polipropileno puro (1194,77 MPa). El compuesto reforzado con fibra continua de abacá al 25%, registra 3 veces más resistencia a la flexión que la matriz de polipropileno pura. Se destaca también la configuración que tiene 25% de refuerzo: fibra corta de abacá de 10 mm al 75% y fibra de vidrio al 25%, la misma que es más de 2 veces resistente a la flexión que la matriz sin refuerzo. Estas mismas configuraciones son superiores que la matriz en cuanto a su módulo de elasticidad en los ensayos de flexión, siendo la de fibra continua 5 veces mayor que el módulo de la matriz y el material con fibra corta de abacá de 10 mm, casi 4 veces mayor que el polipropileno sin refuerzo.

En la Tabla 1.17 se presentan las propiedades mecánicas a tracción de materiales compuestos de matriz de ácido poliláctico reforzado con fibra de abacá.



Tabla 1.17. Propiedades mecánicas a tracción de materiales compuestos de PLA-abacá. [31]

Tipo de material	Fracción volumétrica de fibra	Resistencia a tracción promedio	Módulo de elasticidad promedio	Resistencia a la flexión promedio	Módulo de elasticidad a la flexión promedio
	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
<b>Matriz PLA</b>	0	50	4030	69	2755
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	13	38	3980	61	3592
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	20	35	3366	43	2359
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	13	89	6640	97,5	4292
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	20	132	9223	104,4	5570

La formulación de material compuesto de abacá-ácido poliláctico que presentó las mejores propiedades mecánicas en tracción fue la correspondiente a la configuración de fibra continua unidireccional y de fracción volumétrica de refuerzo de 0,20. Esta formulación permitió al compuesto superar las propiedades mecánicas de la matriz de ácido poliláctico en aproximadamente el 165% con respecto a la resistencia máxima a la tracción (132 MPa), y 130% con respecto al módulo de elasticidad (9223 MPa).

La formulación de material compuesto de abacá-ácido poliláctico que presentó las mejores propiedades mecánicas en flexión fue la correspondiente a la configuración de fibra continua unidireccional y de fracción volumétrica de refuerzo de 0,20; formulación que permitió al compuesto superar las propiedades mecánicas de la matriz de ácido poliláctico en aproximadamente el 50 % en la resistencia máxima a la flexión (104,4 MPa) y 100 % en el módulo de elasticidad (5570 MPa).

En la Figura 1.17 se presentan las curvas esfuerzo-deformación a tracción de materiales compuestos de matriz de ácido poliláctico reforzado con fibra de abacá.

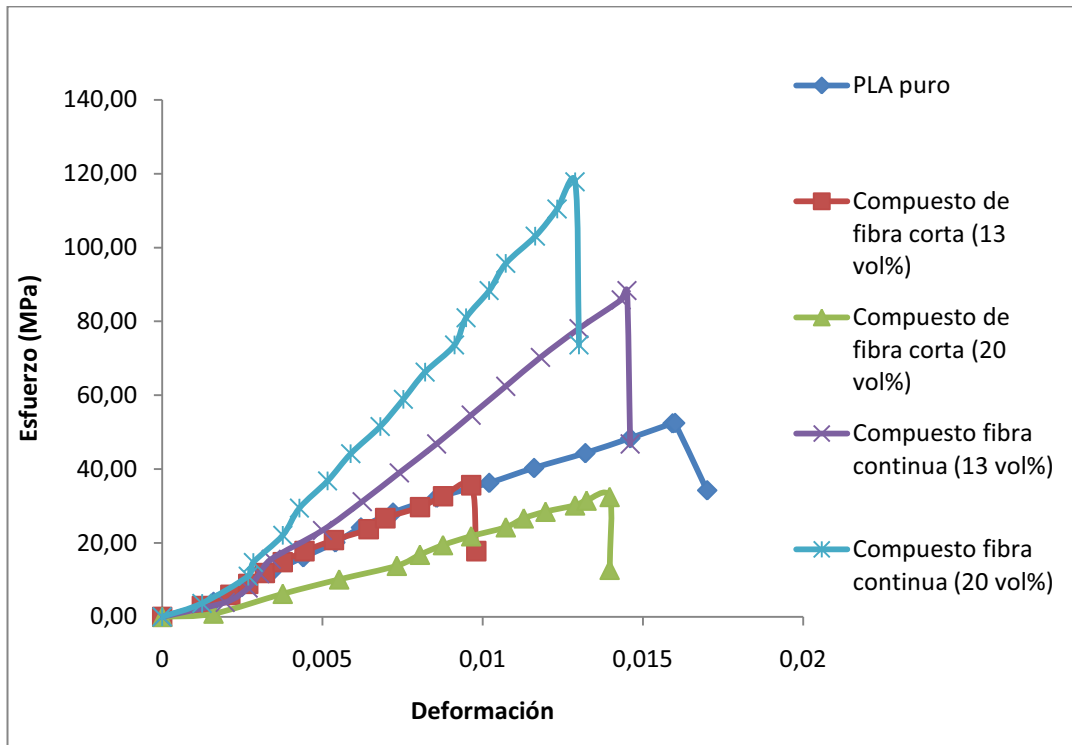


Figura 1.17. Curvas esfuerzo vs. deformación de materiales compuestos PLA-abacá. [31]

En la Figura 1.18 se observa un gráfico de barras donde se puede comparar el esfuerzo máximo a tracción y la energía de impacto de compuestos de PLA.

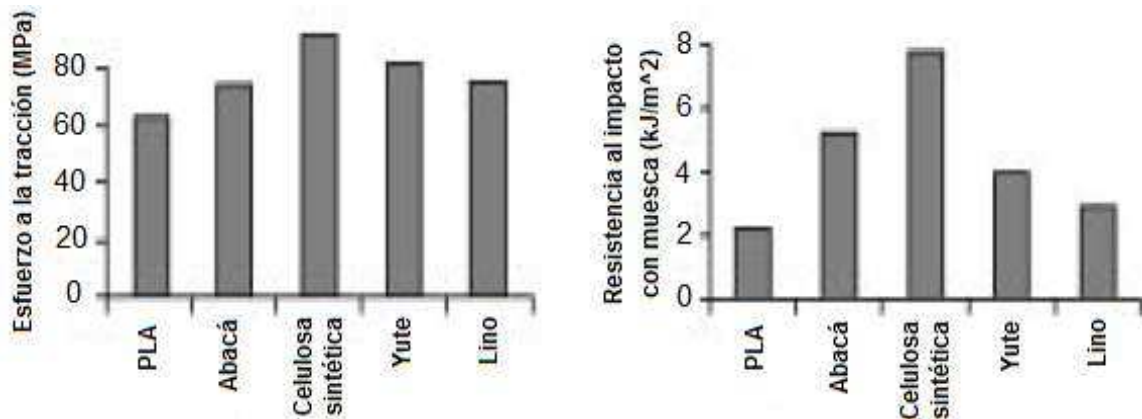


Figura 1.18. Influencia de diferentes fibras naturales en el esfuerzo máximo a tracción y la energía de impacto para ensayo charpy con muesca en compuestos de PLA. [33]

De la información recopilada se obtienen rangos de valores de las propiedades mecánicas con respecto a los diferentes compuestos de matriz termoestable y

termoplástica y los diferentes refuerzos de fibras sintéticas y naturales. Cabe mencionar que dentro de las fibras naturales se puede diferenciar los valores de la fibra corta y fibra larga, ya que existe gran variación en las propiedades.

Tabla 1.18. Rangos de valores de las propiedades mecánicas de los diferentes compuestos de matriz termoestable y termoplástica.

<b>Compuestos de matriz termoestable reforzados con fibra sintética</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
60	UP	Vidrio	400	EP	Vidrio	4,5	UP	Vidrio	41	EP	Vidrio
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
35	MF	Vidrio	900	EP	Vidrio	4	UP	Vidrio	37	EP	Vidrio
<b>Compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra sintética</b>											
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
40	PP	Vidrio	180	PEEK	Vidrio	2,7	PP	Vidrio	12	PEEK	Vidrio
<b>Compuestos de matriz termoestable reforzados con fibra natural corta</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
14	UP	Coco	104	EP	Yute	1,4	UP	Coco	15	EP	Yute
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
31	UP	Coco	150	EP	Yute	3	UP	Yute	15	EP	Yute
<b>Compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra natural corta</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
14	Biopol	Paja	66	PLA	Lino	1,4	Biopol	Paja	6,3	PLA	Kenaf
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
34	PP	Abacá	61	PLA	Abacá	2,3	PLA	Abacá	3,2	PP	Abacá
<b>Compuestos de matriz termoestable reforzados con fibra natural longitudinal</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
45	UP	Coco	300	EP	Sisal	3,9	UP	Abacá	8,5	EP	Sisal
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
56	UP	Coco	192	UP	Sisal	3,5	UP	Abacá	7,5	UP	Sisal
<b>Compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra natural longitudinal</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
89	PLA	Abacá	145	PP	Abacá	6,6	PLA	Abacá	10,1	PP	Abacá

Continúa Tabla 1.18:

Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
63	PP	Abacá	104	PLA	Abacá	4,3	PLA	Abacá	7,1	PP	Abacá
<b>Compuestos híbridos de matriz termoestable</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
24	UP	C-V	238	EP	Y-V	2,1	UP	A-V	31	EP	Y-V
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
64	UP	C-V	642	EP	Y-V	2,7	UP	A-V	28	EP	Y-V
<b>Compuestos híbridos de matriz termoplástica</b>											
Esfuerzo a la tracción (MPa)						Módulo elástico a tracción (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
35	PP	FCA-V	139	PP	FLA-V	3,9	PP	FCA-V	11,1	PP	FLA-V
Esfuerzo a la flexión (MPa)						Módulo elástico a flexión (GPa)					
Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra	Mínimo	Matriz	Fibra	Máximo	Matriz	Fibra
37	PP	FCA-V	75	PP	FLA-V	2,5	PP	FCA-V	5,2	PP	FCA-V

UP: poliéster insaturado; EP: epoxy; MF: melanina; PP: polipropileno; PEEK: polieteretercetona; PLA: ácido poliláctico; C: coco; V: vidrio; Y: yute; A: abacá; FCA: fibra corta de abacá; FLA: fibra larga de abacá.

En la tabla anterior se observa claramente que los rangos de valores son de gran amplitud y varían dependiendo de la matriz y el refuerzo utilizado. Se puede apreciar que los compuestos reforzados con fibra de vidrio son los que presentan las propiedades más elevadas. Por este lado, los materiales con estas características serían la mejor opción, pero se pierde la objetividad de biodegradabilidad y naturalidad. Por esta razón, reviste importancia el análisis de los compuestos reforzados con fibras naturales. De esta manera, se distingue el refuerzo natural de fibra corta y larga, lográndose mejores resultados con el segundo. Por tal motivo, se advierte que la configuración de fibra larga representa una excelente opción de refuerzo, alentando el desarrollo del presente proyecto con la obtención de propiedades elevadas, ya que la cabuya presenta configuraciones continuas en hilo y tejido.

En cuanto a los resultados de impacto, en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional se han realizado varios ensayos de materiales de diferentes matrices termoestables y termoplásticas reforzados con varias fibras naturales y sintéticas. En la Tabla 1.19 se resumen estos resultados

conjuntamente con varios datos bibliográficos como los compuestos reforzados con banana y sisal.

Tabla 1.19. Resumen de resultados de varios materiales ensayados a impacto. [13] [27] [30] [31]

[32]

Fracción volumétrica	Formulaciones	Energía de falla
<b>Matriz de resina poliéster</b>		
0	Poliéster	0,07 J
0,2	Fibra de vidrio	0,508 J
0,15	Fc50-Fv50	0,323 J
0,2	75A/25V	0,492 J
40%wt	Compuesto de fibra unidireccional de sisal	98 (kJ/m <sup>2</sup> )
30%wt	Compuesto de fibra unidireccional de banana	52 (kJ/m <sup>2</sup> )
30%wt	Compuesto de fibra unidireccional de coco	44 (kJ/m <sup>2</sup> )
40%wt	Compuesto de fibra corta de sisal	30 (kJ/m <sup>2</sup> )
30%wt	Compuesto de fibra corta de banana	10 (kJ/m <sup>2</sup> )
30%wt	Compuesto de fibra corta de coco	11 (kJ/m <sup>2</sup> )
<b>Matriz de polipropileno</b>		
-	Polipropileno	3,64 J
20	FV20	12,37 J
20	FC201002	8,35 J
20	FC201003	6,39 J
20	FC201004	5,41 J
20	FC201005	2,61 J
20	FC202002	7,51 J
20	FC202003	7,05 J
20	FC202004	4,63 J
20	FC202005	2 J
20	FL2002	8,74 J
20	FL2003	10,13 J
20	FL2004	10,99 J
20	FL2005	6,75 J
25	FV25	12,37 J
25	FC251002	7,92 J
25	FC251003	6,91 J
25	FC251004	5,61 J
25	FC251005	2,98 J
25	FC252002	9,99 J
25	FC252003	5,98 J
25	FC252004	5,35 J
25	FC252005	3,54 J
25	FL2502	11,13 J
25	FL2503	9,45 J
25	FL2504	8,67 J
25	FL2505	4,98 J

Continúa Tabla 1.19:

Fracción volumétrica	Formulaciones	Energía de falla
<b>Matriz de ácido poliláctico</b>		
-	0	196,94 (J/m)
13	Compuesto de fibra corta de abacá 10 mm	196,48 (J/m)
20	Compuesto de fibra corta de abacá 10 mm	500,22 (J/m)
13	Compuesto de fibra longitudinal de abacá	637,1 (J/m)
20	Compuesto de fibra longitudinal de abacá	711,57 (J/m)

#### 1.4. VARIABLES DE PROCESAMIENTO POR ESTRATIFICACIÓN

El término estratificación hace referencia al término latino “stratus”, con el que se alude a la palabra estratos, lo que indica que la formación del proceso o del material es mediante una serie de capas o divisiones. Esto se relaciona con el refuerzo dentro del material compuesto, que es colocado y orientado en la dirección requerida formando diferentes capas. Además, durante la elaboración del material compuesto se deben cumplir con una serie de pasos fundamentales dentro de su procesamiento que son: impregnación, estratificación, consolidación y solidificación.

La impregnación es el paso en el cual se forma una lámina debido a la mezcla de fibras y resinas. Es decir, las fibras son humedecidas de matriz. En este momento se debe cuidar la correcta humectación de resina en las fibras para evitar tener aire atrapado dentro del compuesto, producto del espacio latente entre varias fibras unidas entre sí.

La estratificación es el paso en el cual los compuestos laminados son formados por la mezcla de resina y la fibra impregnada, la cual es colocada en la dirección de carga requerida. La orientación de la fibra puede ser realizada de manera manual o automática. El propósito de la estratificación es establecer la arquitectura de las fibras requeridas por el diseño. El espesor requerido se obtiene colocando varias capas de resina y fibra mezclada.

La consolidación es el paso en el cual se establece el contacto entre láminas, asegurando la eliminación de aire entre capas. La presión que se aplica es compartida entre la resina y la fibra. En caso de producirse una mala consolidación, el resultado será una pieza con una gran cantidad de poros distribuidos superficial y sub-superficialmente.

La solidificación es el último de los pasos, en el cual para la matriz termoestable puede tardar 120 minutos o más, manteniéndose la presión durante todo el proceso de solidificación. Este tiempo depende de la composición de la resina, catalizadores y acelerantes. Este paso define la tasa de producción ya que mientras más rápido solidifique el material, más piezas se obtendrán.

Cada uno de los pasos mencionados tiene vital importancia en el desarrollo del compuesto, por lo que hay que dedicarles especial atención. De esta manera se puede asegurar que el producto final obtenido sea de calidad, con propiedades físicas y mecánicas acordes a lo esperado. En la Figura 1.19 se puede apreciar el esquema de procesamiento por estratificación.

Ítem	Etapas del proceso	Acciones	Imagen
1	Impregnación	Correcta humectación de las fibras.	
2	Estratificación	Orientación de refuerzo. Depende del tipo de refuerzo.	
3	Consolidación	Aplicar presión durante el moldeo. Asegurar mínima cantidad de poros.	


Ítem	Etapa del proceso	Acciones	Imagen
4	Solidificación	<p>Tiempo de solidificación.</p> <p>Depende de la cantidad de iniciador y acelerante.</p> <p>Mantener la presión durante todo el proceso.</p>	

Figura 1.19. Esquema de procesamiento por estratificación.

#### 1.4.1 VARIABLES DEL PROCESO DE CURADO DE LA RESINA POLIÉSTER

La resina de poliéster insaturado, o simplemente resina poliéster, es el termoestable más utilizado para la formulación de materiales compuestos en el Ecuador. El poliéster se obtiene por la reacción de ácidos orgánicos disfuncionales con un alcohol disfuncional. Los ácidos utilizados incluyen maleico, fumárico, ftálico y tereftálico. Los alcoholes son glicol etileno, glicol de propileno, y glicol halogenado.

Esta resina es muy versátil, de fácil manipulación, tiene amplia disponibilidad en el mercado con un bajo costo y ofrece una excelente resistencia a la corrosión. Por sí sola usualmente no tiene resistencia suficiente, por lo cual necesita ser reforzada con materiales que mejoren sus propiedades mecánicas. Para este propósito se utilizan varios tipos de fibras naturales y sintéticas.

Las resinas son sustancias líquidas que mediante una reacción química inducida por un agente externo pueden pasar al estado sólido. A este proceso se le denomina curado. Para iniciar el curado se necesita la presencia de un catalizador (iniciador) y un acelerante. La reacción es exotérmica, comenzando la elevación de la temperatura en el instante en que se produce la mezcla de los diferentes elementos, siendo capaz de subir la temperatura de la resina hasta los 160°C.



El curado de una resina poliéster comienza tan pronto como se añade el iniciador, en este caso octoato de cobalto. La velocidad de la reacción depende de la temperatura y la reactividad de la resina y el catalizador. Es esencial disponer de cantidades suficientes de iniciador y acelerador para asegurar el adecuado proceso de curado.

Los acelerantes, en el presente caso MEKP (peróxido de metil-etil cetona), son compuestos químicos que al reaccionar con el catalizador permiten que la polimerización tome parte a una temperatura menor. Una vez que se ha iniciado la polimerización, los inhibidores permiten que medie un determinado tiempo hasta que se produzca el endurecimiento para que la resina pueda ser trabajada.

El proceso de curado consta principalmente de tres fases:

- La gelificación; en la que se produce el paso de la resina de un estado inicial viscoso, pero con facilidad de fluir, a un gel blando.
- El endurecimiento; la resina pasa de un gel blando a sólido.
- La maduración; durante la cual la resina adquiere todas sus características mecánicas y químicas.

Las dos primeras etapas son relativamente cortas, comparadas con el tiempo de maduración, y dependen de la cantidad de catalizador y acelerante utilizados. Por el contrario, la última etapa puede tardar varias horas si se utiliza una estufa calefactora o varios días si se lo realiza a temperatura ambiente. Este factor depende de la disponibilidad de equipos para dar temperatura durante la maduración de la resina.

En muchas aplicaciones se utilizan resinas curadas en frío, aun cuando estas no alcancen las mejores propiedades. Sin embargo, es necesario indicar que precisamente la posibilidad que tienen las resinas poliéster de ser curadas en frío es lo que las hace mucho más adecuadas que cualquier otro sistema de resina para la manufactura de estructuras de gran tamaño.

Los principales factores que intervienen en el proceso de curado son:

- El tipo de resina empleada.
- La temperatura ambiente, la mayoría de resinas no curan a temperaturas inferiores a 10°C.
- La naturaleza y cantidad de catalizador y acelerador.
- La humedad relativa.
- El exceso de insolación, los rayos ultravioletas son perjudiciales.
- Incremento en la temperatura del proceso.

Se pueden controlar los tiempos de curado actuando sobre los parámetros de temperatura, cantidad de catalizador y acelerador. Sin embargo, esta circunstancia pierde interés en la manufactura individual ya que la importancia de este hecho viene acompañada de la capacidad de incrementar la tasa de producción en la producción en serie. Los valores referenciales de tiempo de gel se pueden apreciar en las Tablas 1.20 y 1.21.

Tabla 1.20. Tiempos de gel de la resina poliéster ANDERPOL 859 a 25°C con diferentes cantidades de MEKP y octoato de cobalto.

% MEKP	Tiempos de gel (min)		
	0,2 % Co	0,3% Co	0,5% Co
1,0	10	8	13
1,5	7	5	9

Tabla 1.21. Tiempos de gel del ANDERPOL 859 con 1% de MEKP diferentes cantidades de octoato de cobalto.

Temperatura (°C)	Tiempos de gel (min)		
	0,2 % Co	0,3% Co	0,5% Co
15,0	33	23	16
25	15	10	8
35	7	5	4

#### 1.4.2 MAQUINADO DE COMPUESTOS

A pesar de que los polímeros reforzados con fibra (PRF) son producidos con forma cercana a la forma final, o neta, el maquinado es requerido para llevar el componente dentro de las dimensiones finales y prepararlo para un ensamblado. El maquinado de los PRFs puede tener lugar antes y después del curado. El

maquinado antes del curado implica el corte del refuerzo al tamaño adecuado para ajustarse al molde donde se realizará el curado. Los refuerzos pueden ser fibras secas o impregnadas de resina, hilos o tejidos. El maquinado de PRFs curados se lleva a cabo por métodos convencionales o no convencionales de eliminación de material.

Los métodos convencionales utilizados con más frecuencia son el recorte de bordes, fresado, taladrado, avellanado, torneado, aserrado y triturado. Entre los procesos no convencionales están el chorro de agua con abrasivos y el corte por haz láser. Muchos de estos procesos se desarrollaron originalmente para el trabajo en madera y la industria metalúrgica. Sin embargo, fueron trasladados convenientemente al mecanizado de PRFs después de los ajustes adecuados en la geometría de las herramientas, velocidad de corte y velocidad de avance. No obstante, la cinemática del proceso de mecanizado sigue siendo la misma.

El maquinado de los PRFs es diferente en muchos aspectos al maquinado en metales. Los PRFs son materiales no homogéneos que constan de fases claramente diferentes. Las fibras de refuerzo, por lo general, son fuertes y frágiles y pueden tener una conductividad térmica muy pobre, como es el caso de la fibra de vidrio. La matriz polimérica, por otro lado, es débil y algo dúctil. Sus propiedades térmicas son pobres y la tolerancia a altas temperaturas es un factor limitante en el procesamiento post-curado. El mecanizado de metales se caracteriza por corte y la deformación plástica y la acción de corte forma viruta continua que fluye sobre la cara de la herramienta. Además, bajo condiciones de corte fijas, el proceso alcanza una condición de equilibrio donde las fuerzas de corte, temperatura de corte, y el acabado superficial se podrían predecir con aceptable precisión. El maquinado de PRFs, por otra parte, se caracteriza por la fractura intermitente incontrolada. Las fuerzas oscilantes de corte son típicas debido a la fractura intermitente de las fibras. Entonces, la maquinabilidad de los PRFs se determina principalmente por las propiedades físicas y mecánicas de la fibra y la matriz, así como también del contenido y orientación de las fibras.

## Corte

El corte es una operación que se utiliza para alcanzar las dimensiones deseadas o para obtener varias partes de un determinado elemento mediante la acción de dos fuerzas con sentido contrario. Se realiza mediante el uso de sierras de mano, sierras circulares, caladoras, limas abrasivas, etc. Durante el mecanizado, la velocidad de corte debe ser tan alta como la matriz pueda soportar para obtener un buen acabado de la superficie.

En los materiales compuestos se utilizan herramientas de corte similares a las usadas en el maquinado de metales. Las herramientas de acero rápido sin ningún tipo de recubrimiento se pueden utilizar para unos pocos cortes, pero después de un tiempo, el filo de la herramienta se vuelve opaco y se deteriora la calidad de corte. Para evitar el desgaste excesivo de la herramienta, se las recubre con carburo de tungsteno, nitruro de titanio o diamante [11].

Los tipos de herramientas utilizadas para el mecanizado de son:

- Herramientas de acero rápido (HSS)
- Herramientas de metal duro (Widia)
- Herramientas de carburo o nitruros (carburo de silicio)
- Herramientas diamantadas (PCD)

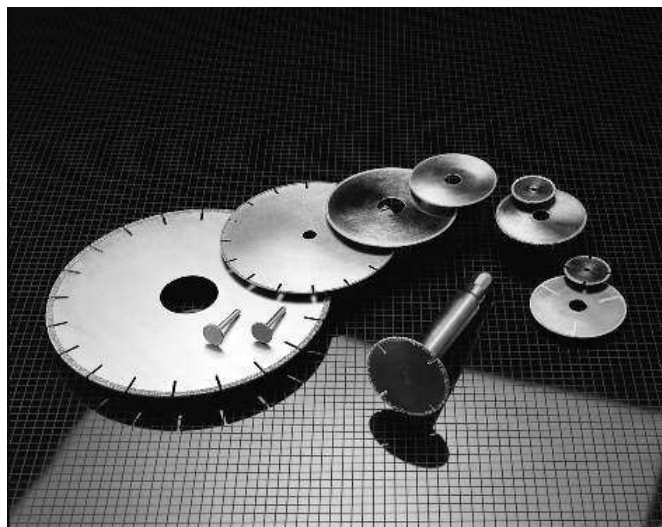


Figura 1.20. Algunas herramientas de corte. [35]

## Taladrado

El taladrado es un proceso de mecanizado mediante el cual se obtienen agujeros cilíndricos en una pieza con herramientas de arranque de viruta. Su ventaja radica en ofrecer un corte continuo. Es considerado como uno de los procesos más importantes dentro de los procesos de maquinado debido a su amplio uso. Los agujeros obtenidos se realizan ya sea con fines de fijación, tales como remaches y pernos, o para la creación de características especiales, como un paso para la inyección de líquido o una conexión de cable.

En el proceso de taladrado se realizan dos movimientos: el movimiento de corte y el de avance. Este proceso genera calor tanto en la pieza como en la herramienta. En materiales compuestos, la generación de calor se debe mantener baja para evitar la degradación de la matriz local e impedir la obstrucción de la herramienta. En cuanto a la velocidad de corte, se debe evitar las velocidades excesivas, puesto que la generación de calor local causa problemas en las propiedades de la matriz y por ende del compuesto.

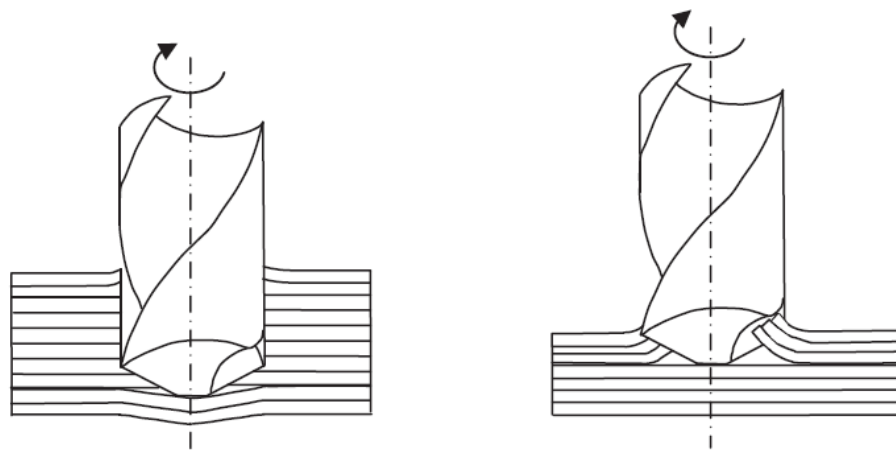


Figura 1.21. Proceso de taladrado: (a) delaminación a la salida de la broca; (b) delaminación a la entrada de la broca. [35]

Los problemas más habituales asociados a esta operación son:

Astillamiento (splintering).- La resina es cortada, pero parte de las fibras no son cortadas apareciendo fibras en el agujero.

Delaminación (delamination).- Separación de las láminas inferiores del taladrado debido a la fuerza de avance ejercida por la broca. Este fenómeno se minimiza reduciendo el avance de la herramienta durante la etapa final del taladrado.

Extracción.- Consiste en la fragmentación de porciones de fibra o resina en las paredes del agujero taladrado.

Los parámetros más importantes dentro del proceso de taladrado son avance y velocidad de corte. Un taladro manual cuenta con una velocidad de corte de 2800 rpm, suficiente para agujerear el material en estudio. La velocidad de avance en cambio, es controlada por el operador. Por consiguiente, un taladro manual normal es adecuado para elaborar agujeros en el composite poliéster-cabuya.

En este trabajo se decidió experimentar con hilo y tejido ya que se obtienen refuerzos continuos unidimensionales y bidimensionales. De esta manera, se puede esperar que el material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de cabuya tenga propiedades interesantes que se evidencien durante el desarrollo del presente proyecto.

## **1.5. OBJETIVOS Y ALCANCE**

### **1.5.1. OBJETIVOS**

El objetivo general del presente trabajo es:

Obtener materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación manual y definir el material que presente la mejor combinación de propiedades, con miras a fabricar un prototipo de un producto existente en el mercado.

Los objetivos específicos comprenden:

- Obtener probetas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya considerando variables como: la configuración del refuerzo y su fracción volumétrica.
- Evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos formulados mediante ensayos de tracción y flexión.
- Obtener probetas para ensayos de impacto con el material que muestre la mejor combinación de propiedades.
- Fabricar un prototipo de un material existente en el mercado con la formulación del material compuesto que muestre la mejor combinación de propiedades.
- Evaluar el desempeño funcional del prototipo fabricado a partir del material compuesto.

#### **1.5.2. ALCANCE**

- Se obtendrán probetas de matriz poliéster utilizando como refuerzo fibra de cabuya presente en el mercado local con el fin de aprovechar los diferentes hilos y tejidos fabricados en el país.
- Se compararán los diferentes tejidos e hilos del mercado con el fin de determinar los más adecuados para su utilización como refuerzo en las probetas de material compuesto.
- Para determinar las propiedades mecánicas del material compuesto se utilizarán moldes para elaborar probetas normalizadas de tracción según la norma ASTM D 3039-08 y de flexión según la norma ASTM D 7264-07.

- Para las configuraciones del refuerzo se ensayarán arreglos con: fibra orientada longitudinalmente, fibra en tejido plano orientado a 0° y 45° con respecto al eje de las probetas.
- La formulación de material compuesto que presente la mejor combinación de propiedades será también evaluada a través de ensayos de impacto de acuerdo con la norma ASTM D 5420-10.
- Se analizarán los resultados y se seleccionará el material compuesto con las mejores propiedades mecánicas, con el que se fabricará un prototipo de un producto existente en el mercado.
- Finalmente se evaluará el desempeño funcional del prototipo considerando sus dimensiones, peso y desempeño mecánico.



## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

En este segundo capítulo se presenta la metodología experimental, y se describen: (i) las características de los materiales empleados para obtener los compuestos y (ii) los equipos utilizados, describiendo su uso y especificaciones. A continuación, se presentan los ensayos preliminares en donde se definen las diferentes configuraciones en cuanto a la máxima fracción volumétrica de refuerzo. Se presenta la caracterización de la fibra de cabuya en cuanto a hilo y tejido. Seguidamente se encuentra el procedimiento experimental y la caracterización mecánica del material compuesto obteniéndose y analizando la mejor configuración del material compuesto. Finalmente, se describe la obtención y evaluación del prototipo que remplazará un producto existente en el mercado.

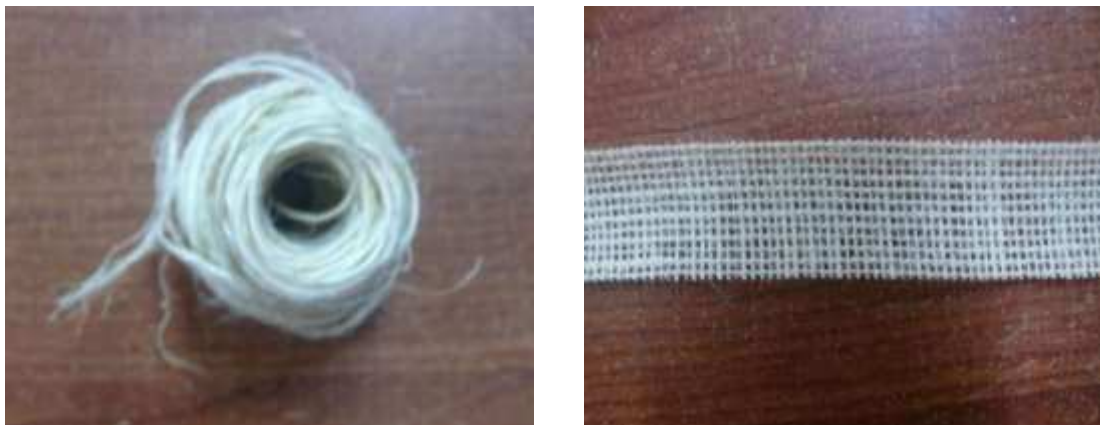
#### **2.1. MATERIALES Y EQUIPOS**

El objetivo fundamental planteado para este trabajo es obtener materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya y determinar sus propiedades mecánicas. Para esto, se decidió trabajar con refuerzos continuos que garantizan el incremento en las propiedades del material como esfuerzo máximo a la tracción. Los materiales compuestos fueron elaborados con hilo y tejido de cabuya con los cuales se obtienen refuerzos unidimensionales y bidimensionales. Ambas formas de configuración de la fibra fueron utilizadas para elaborar probetas, las cuales se ensayaron a tracción, flexión e impacto bajo las respectivas normas. También se realizó un prototipo en busca de remplazar un producto existente en el mercado. Para lograr este objetivo se utilizaron los materiales y equipos que se describen a continuación.

## 2.1.1. MATERIALES

### 2.1.1.1. Fibra de Cabuya

Para la realización del presente estudio se utilizó fibra de cabuya, la cual es extraída de la planta del mismo nombre. Es cultivada y procesada en la provincia de Imbabura. De igual manera, en este lugar se elaboran los diferentes hilos y tejidos, los mismos que se emplearon en diferentes configuraciones para la fabricación de composites. En la Figura 2.1 se puede apreciar muestras del hilo y del tejido de cabuya, y en la Tabla 2.1 se observan las características de los hilos y tejidos usados.



(a)

(b)

Figura 2.1. Muestras de: (a) hilo de cabuya; (b) tejido de cabuya.

Tabla 2.1. Caracterización de hilos y tejidos de cabuya.

<b>Hilo de cabuya</b>	
Fino	$9,231 \times 10^{-3} \text{ g/cm}$
Grueso	$12,71 \times 10^{-3} \text{ g/cm}$
<b>Tejido de cabuya</b>	
Fino	$14,354 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$
Normal	$22,963 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$
Grueso	$29,81 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$

### 2.1.1.2. Resina Poliéster

La denominación comercial de esta resina es ANDERPOL 859, la cual fue suministrada por Poliquim. Está clasificada como líquido inflamable por tener un punto de inflamación de 31°C y por tanto debe mantenerse alejada de llamas abiertas. Se recomienda almacenarlo a temperaturas inferiores a 20°C para obtener la máxima estabilidad. Se suministra en tambores metálicos de 230 kilos y tiene un tiempo de vida de seis meses desde el momento de su fabricación.

La resina poliéster, utilizada como matriz del compuesto en el presente proyecto, necesita de un agente externo para su paso de estado líquido a sólido. Como agente externo se utilizaron dos compuestos: (i) octoato de cobalto que actuó como iniciador del proceso de curado y (ii) peróxido de metil-etil cetona (MEKP), el cual cumple la función de acelerador del proceso de curado. También se puede añadir estireno a la resina, con el objetivo de disminuir su viscosidad y mejorar la mojabilidad de las fibras, lo cual es importante para alcanzar una adecuada interfaz matriz-refuerzo. Todos estos elementos se utilizan conjuntamente con la resina, pero hay que tomar en cuenta que la cantidad de cada uno de ellos viene recomendada por el fabricante dentro de la ficha técnica. La fórmula general recomendada en partes por peso para el curado en frío de la resina poliéster ortoftálica ANDERPOL 859 es la que se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Fórmula general recomendada para el curado.

<b>Materiales</b>	<b>Partes por peso</b>
ANDERPOL 859	100
Estireno	1
Octoato de Cobalto	0,2 a 0,5
MEKP	1,0 a 2,5

El tiempo de gel lo controla principalmente la cantidad de octoato de cobalto. La cantidad de peróxido se puede variar para corregir fluctuaciones de temperatura de trabajo. El curado nunca se debe realizar a temperaturas inferiores a 15°C porque no se alcanza buenas propiedades mecánicas.

### 2.1.2. EQUIPOS

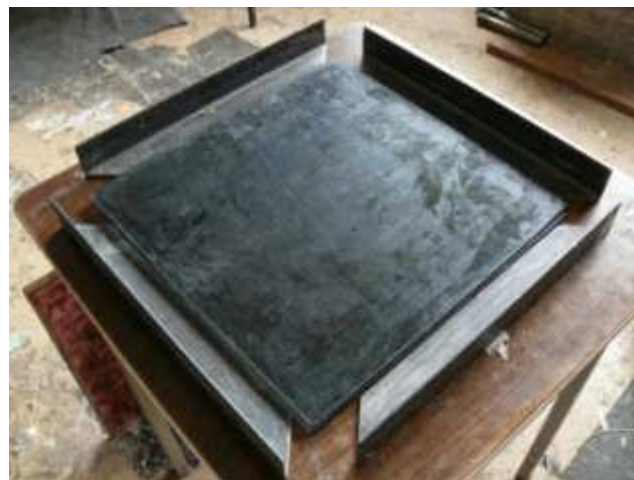
Todos los procedimientos de ensayos destructivos vienen normalizados para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos y este caso no es la excepción. Las probetas utilizadas para los diferentes ensayos tienen dimensiones determinadas por lo que se deben utilizar moldes que garanticen sus especificaciones. Las normas usadas son: ASTM D 3039-08 para tracción, ASTM D 7264-07 para flexión y ASTM D 5628-10 para impacto. Los moldes que se emplearon para este propósito se muestran a continuación en la Figura 2.2.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2. Moldes de: (a) tracción; (b) flexión; (c) impacto.

El primer molde, mostrado en la Figura 2.2 (a), es utilizado para obtener probetas unitarias de tracción con las dimensiones normalizadas que se muestran en la Figura 2.3.

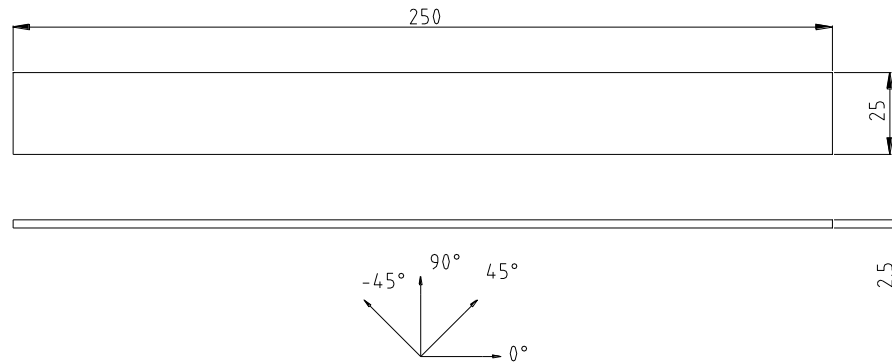


Figura 2.3. Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción, según la norma ASTM D 3039-08.

El segundo molde, mostrado en la Figura 2.2 (b), es utilizado para obtener probetas unitarias de flexión con dimensiones normalizadas que se presentan en la Figura 2.4.

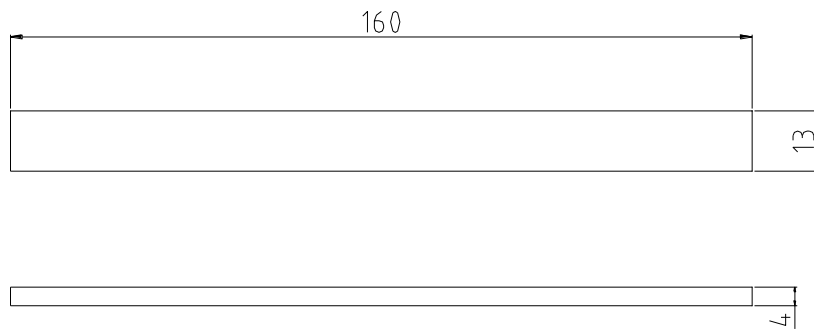


Figura 2.4. Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión, según la norma ASTM D 7264-07.

En cambio, en el tercer molde de la Figura 2.2 (c), se obtiene un tablero cuyas dimensiones son de 40 x 40 cm del cual se deben recortar las probetas de impacto con las dimensiones normalizadas que se observan en la Figura 2.5.

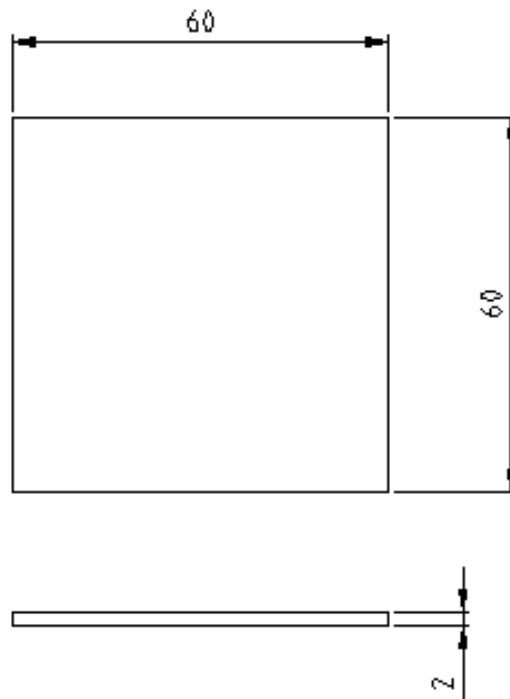


Figura 2.5. Dimensiones de la probeta para ensayo de impacto, según la norma ASTM D 5628-10.

Para pesar tanto la fibra como las probetas de material compuesto se utilizó una balanza electrónica digital AE ADAM modelo PGL 6001, la cual tiene una capacidad de 6000 g y una apreciación de 0,1 g. La balanza se presenta en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Balanza electrónica digital AE ADAM.

La aplicación de presión en el moldeo de las probetas se realizó mediante una prensa hidráulica manual de doble columna, la cual cuenta con una capacidad de 5 toneladas. Esta prensa hidráulica se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Prensa hidráulica manual.

Las probetas de flexión y tracción son ensayadas en la máquina universal Tinius Olsen modelo H25K-S UTM. Las especificaciones de este equipo son detalladas a continuación:

- Velocidades de prueba y desplazamiento: 0,001 a 1000 mm (0,001 a 40 pulg) por minuto para fuerzas de 10 kN y 500 mm (20 pulg) por minuto para carga completa de 25 kN.
- Celda de carga: 25 kN de capacidad.
- Velocidad de retorno: 0,001 a 1000 mm (0,001 a 40 pulg)/min.
- Velocidad del cabezal: 1100 mm/min (43,3 pulg/min) con celda de carga de 25 kN.
- Espacio de trabajo: separación vertical de 1100 mm (43,3 pulg) sin ninguna herramienta y separación horizontal de 405 mm (16 pulg) entre columnas.

La máquina universal de ensayos se presenta en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Máquina universal de ensayos Tinus Olsen modelo H25K-S UTM.

Las probetas para tracción son ensayadas usando mordazas cuneiformes conjuntamente con el extensómetro que se muestran en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Mordazas cuneiformes y extensómetro.



Las probetas para flexión son ensayadas usando el equipo de flexión a tres puntos que se presenta en la Figura 2.10.

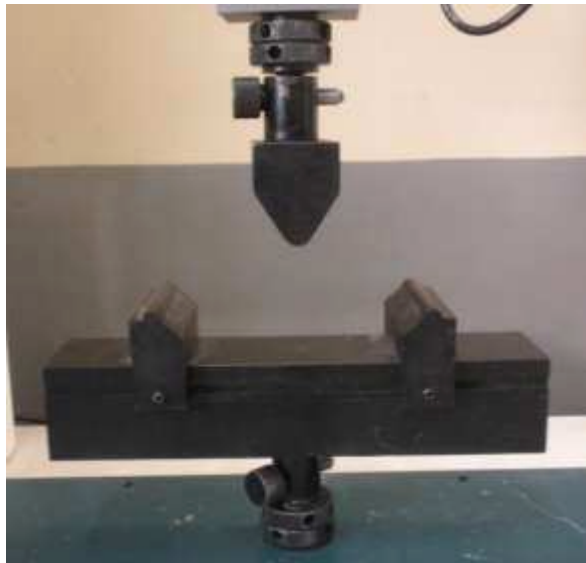


Figura 2.10. Equipo de flexión a tres puntos.

Las probetas de impacto fueron ensayadas con el equipo de caída de dardo. La norma sugiere que la elección del dardo sea arbitraria en base a la disponibilidad de los equipos del laboratorio. El equipo utilizado se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Equipo de caída de dardo.

El dardo tiene una longitud de 69 mm, una nariz hemisférica de 20 mm de diámetro y su peso es 0,0706 kg. El anillo posee 4 puntos de sujeción, tiene un diámetro interno de 40 mm y un diámetro externo de 250 mm. Estos elementos se pueden apreciar en la Figura 2.12.



(a)



(b)

Figura 2.12. Accesorios de equipo de impacto: (a) anillo de sujeción; (b) dardo hemisférico.

Para realizar el curado a una temperatura de 40°C se utiliza una estufa VENTICELL, que se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Estufa Venticell.

Esta estufa sirve para calentar materiales con aire forzado mediante un ventilador. El diseño posee un rango de temperatura que va desde 10°C hasta 250°C.

## 2.2. ENSAYOS PRELIMINARES

La caracterización del material planteado en el presente estudio se logra mediante la elaboración de probetas para ser ensayadas a tracción y flexión. Para obtener las probetas mencionadas, se realizaron ensayos preliminares con el objetivo de encontrar la mayor fracción volumétrica de refuerzo, mejor hilo y mejor tejido de cabuya de entre los disponibles en el mercado. En el apartado 2.3 se presenta la caracterización tanto de hilos como de los tejidos de cabuya.

Basado en datos experimentales desarrollados en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) y la ficha técnica de la resina ANDEPOL 859 (mostrada en el Anexo 4), se encontró que la mejor configuración de elementos constitutivos para la elaboración de la matriz de resina poliéster y presión aplicada en la realización de probetas es la siguiente:

Tabla 2.3. Configuración para la elaboración de la matriz de resina poliéster y presión aplicada.

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>
Estireno	10%
Octoato de Cobalto	0,50%
Peróxido de metil-etil cetona	1%
Presión	1000 psi

Con esta configuración se obtienen probetas de alta calidad, en las cuales la cantidad de burbujas presentes es mínima. El tiempo de solidificación se encuentra entre 60 y 90 minutos y las dimensiones resultantes están dentro de lo establecido en las respectivas normas.

Los ensayos preliminares fueron desarrollados con dos objetivos principales: (i) determinar la factibilidad de producción de probetas para ensayos de tracción y flexión con un determinado refuerzo de hilo o tejido de cabuya y (ii) para determinar la mayor fracción volumétrica incorporable en la matriz. Cabe

mencionar que dentro de los hilos se tienen grueso y fino, y dentro de los tejidos existen grueso, normal y fino. En la Figura 2.14 se puede apreciar la metodología experimental utilizada en los ensayos preliminares. Se realizaron 12 diferentes configuraciones para tracción y 8 para flexión, variando los refuerzos y fracciones volumétricas. La diferencia de número de configuraciones se debe a que en las probetas de tracción se definió que el tejido normal es el más adecuado entre los tejidos. Esta información se puede observar en las Tabla 2.4 y 2.5. Para cada configuración se elaboró una probeta, donde se analizó la distribución del refuerzo y las dimensiones finales.

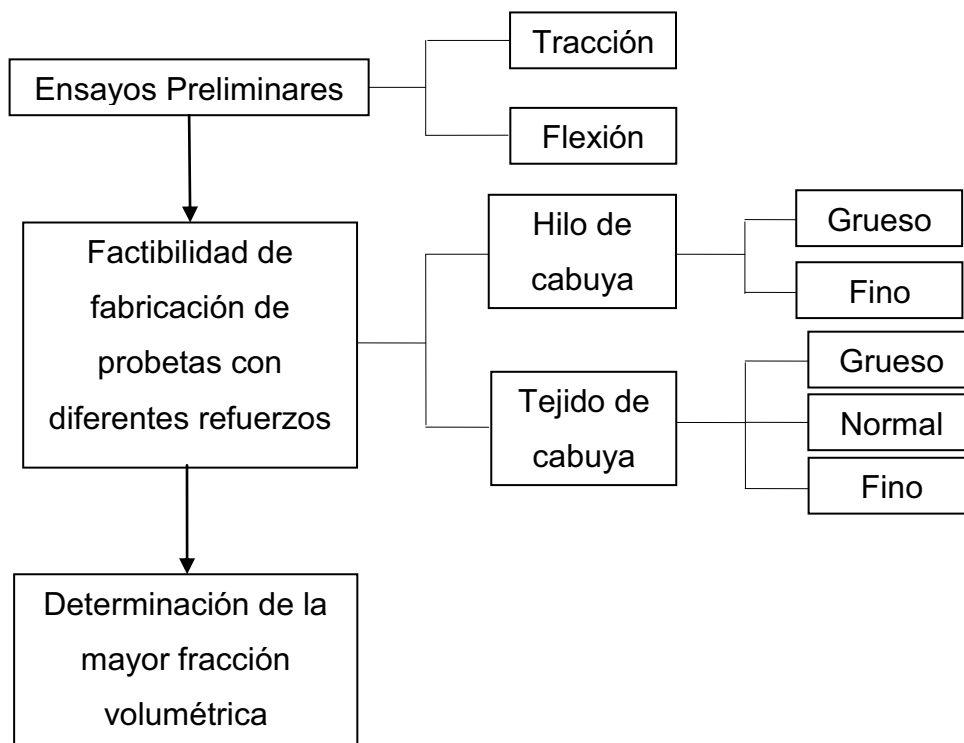


Figura 2.14. Metodología experimental de ensayos preliminares.

### 2.2.1. CÁLCULO DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE REFUERZO

Una forma de representar la cantidad de refuerzo del que está constituido un material compuesto es mediante la fracción volumétrica. Esta fracción permite conocer el valor de refuerzo introducido en la matriz para conformar el material compuesto, teniendo como límite superior a la unidad. En este caso se representa como  $V_f$ , puesto que es la fracción volumétrica de fibra.

Con la finalidad de desarrollar una ecuación que permita calcular la fracción volumétrica de fibra y para comprender de mejor manera lo que representa, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$- \quad 2.1$$

$$\frac{\quad}{\quad} \quad 2.2$$

$$\frac{\quad}{\quad} \quad 2.3$$

$$2.4$$

Reemplazando la Ecuación 2.1 en la Ecuación 2.2 se tiene:

$$\frac{\quad}{\quad} \quad 2.5$$

La Ecuación 2.5 presenta la fracción volumétrica de fibra en función de valores conocidos o fáciles de obtener como son: la masa y densidad de la fibra de cabuya; y el volumen de la probeta que es un valor constante, debido a que sus dimensiones están normalizadas. De esta manera, se puede utilizar esta ecuación para conocer la fracción volumétrica de refuerzo en función de la masa del mismo; es decir, al variar la cantidad de masa se obtienen diferentes valores de fracción puesto que los otros dos valores son constantes.

### **2.2.2. ENSAYOS PRELIMINARES DE PROBETAS A TRACCIÓN**

Dentro de los ensayos preliminares, se elaboraron probetas para ensayos de tracción. Se utilizaron las dos variaciones de fibra de cabuya presentes en el mercado ecuatoriano que son: hilo y tejido de cabuya. El hilo se empleó orientado longitudinalmente, mientras que el tejido se aplicó en capas. Luego, variando el contenido de refuerzo en el material compuesto, se obtuvieron diferentes configuraciones que sirvieron para obtener las probetas con la mayor fracción volumétrica. El valor de densidad en los ensayos preliminares a tracción, tanto

para el tejido como para el hilo de cabuya fue de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , obtenido como dato bibliográfico. [4]

Las características de las probetas usadas en los ensayos preliminares a tracción se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características de probetas usadas en ensayos preliminares a tracción.

PROBETA #	CARACTERÍSTICAS	(g)		MASA DE TEJIDO
1	Hilo longitudinal	3,00	0,15	N/A
2	Hilo longitudinal	4,00	0,20	N/A
3	Hilo longitudinal	5,00	0,25	N/A
4	Hilo longitudinal	6,00	0,30	N/A
5	Tejido Grueso/2capas	3,80	0,19	1,9 g/capa
6	Tejido Grueso/3capas	5,70	0,28	1,9 g/capa
7	Tejido Fino/2capas	3,40	0,17	1,7 g/capa
8	Tejido Fino/3capas	5,10	0,25	1,7 g/capa
9	Tejido Normal/2capas	2,80	0,14	1,4 g/capa
10	Tejido Normal/3capas	4,20	0,21	1,4 g/capa
11	Tejido Normal/4capas	5,60	0,28	1,4 g/capa
12	Tejido Normal/5capas	7,00	0,34	1,4 g/capa

\* La fracción volumétrica de fibra presentada en esta tabla fue calculada con una densidad de cabuya de  $1,3 \text{ g/cm}^3$

En la tabla anterior se pueden observar las características de doce diferentes probetas, elaboradas con hilo orientado longitudinalmente y tres diferentes tejidos. Las cuatro primeras configuraciones se refieren al refuerzo longitudinal con hilo de cabuya. Se empezó con tres gramos pero se observó que existía una pobre cantidad de refuerzo dentro de la probeta. Debido a esto, se decidió introducir una mayor cantidad de fibra en incrementos de un gramo hasta obtener la mayor cantidad de refuerzo dentro del material compuesto. Se elaboraron probetas con tres, cuatro, cinco y seis gramos de cabuya. Cada una de ellas fue analizada dimensionalmente para comprobar si el espesor estaba dentro de lo establecido por la norma ASTM D 3039-08. Todas las probetas cumplieron con los requisitos de espesor establecidos en la norma a excepción de la probeta con seis gramos, la cual sobrepasó el valor superior. La probeta con cinco gramos de fibra se encontró en el límite de espesor, por lo que se consideró a esta configuración la

de mayor fracción volumétrica. En la Figura 2.15 se puede observar el compuesto reforzado con hilo fino de cabuya.



Figura 2.15. Compuesto reforzado con hilo fino de cabuya.

Dentro de los tejidos se tienen: grueso, normal y fino, llamados así por la cantidad de hilos presentes en una determinada longitud. Se realizaron probetas utilizando los diferentes tejidos con la finalidad de comprobar la factibilidad de fabricación. Se elaboraron probetas con dos y tres capas de tejido obteniéndose los siguientes resultados: el tejido grueso presentó dificultades debido a su gran tamaño y separación de los hilos, debido a esto no se obtuvo una buena distribución del refuerzo dentro de la matriz y adicionalmente permitió comprobar que resultaría imposible introducir este tejido dentro del molde de flexión. Por estas razones, el tejido grueso se descartó como refuerzo del material compuesto. El tejido fino en cambio posee los hilos demasiado juntos entre sí, lo cual dificulta el flujo de la resina a través de los espaciamientos resultando en una mojabilidad inadecuada de la fibra. El tejido normal presentó el mejor comportamiento, su separación y tamaño de hilos permitieron un flujo adecuado de la resina, su distribución fue apropiada dentro de la matriz, las dimensiones obtenidas resultaron admisibles y el acabado superficial fue óptimo, por lo cual es la mejor opción entre los tejidos como refuerzo del nuevo material compuesto.

Una vez definido el mejor tejido se realizó el mismo proceso que con el hilo. La diferencia consiste en que el incremento es de una capa de tejido en vez de un gramo. Se elaboraron probetas con dos, tres, cuatro y cinco capas de tejido. Cada una de ellas fue analizada dimensionalmente para comprobar si el espesor constaba dentro de lo establecido por la norma ASTM D 3039-08. Todas las probetas cumplieron con los requisitos de espesor establecidos en la norma, teniendo a la probeta con cinco capas de tejido en el límite de espesor, por lo que

fue esta configuración la de mayor fracción volumétrica incorporable. En la Figura 2.16 se pueden observar los compuestos con diferentes tejidos.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.16. Compuesto reforzado con: (a) tejido grueso; (b) tejido normal; (c) tejido fino.

### 2.2.3. ENSAYOS PRELIMINARES DE PROBETAS A FLEXIÓN

Para los ensayos preliminares de probetas a flexión se realizaron pruebas y análisis similares a los de las probetas a tracción, con la diferencia que se utilizó directamente el tejido normal ya que en los ensayos a tracción se estableció que es la mejor opción entre las tres posibles. En este caso, la norma de referencia es la ASTM D 7264-07. El valor de densidad de la fibra para estos ensayos preliminares a flexión fue de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , obtenido como dato bibliográfico, tanto para el tejido como para el hilo de cabuya.

Las características de las probetas usadas en los ensayos preliminares a flexión se muestran en la Tabla 2.5.



Tabla 2.5. Características de las probetas usadas en ensayos preliminares a flexión.

PROBETA #	CARACTERÍSTICAS	(g)		MASA DE TEJIDO
1	Hilo longitudinal	1,60	0,15	N/A
2	Hilo longitudinal	2,20	0,20	N/A
3	Hilo longitudinal	2,70	0,25	N/A
4	Tejido normal/4capas	1,60	0,15	0,4 g/capa
5	Tejido normal/5capas	2,00	0,18	0,4 g/capa
6	Tejido normal/6capas	2,40	0,22	0,4 g/capa
7	Tejido normal/7capas	2,80	0,26	0,4 g/capa
8	Tejido normal/8capas	3,20	0,30	0,4 g/capa

\* La fracción volumétrica presentada en esta tabla fue calculada con una densidad de cabuya de  $1,3 \text{ g/cm}^3$

En la tabla anterior se pueden observar ocho diferentes probetas, fabricadas con hilo orientado longitudinalmente y tejido normal. Las tres primeras configuraciones se refieren al refuerzo longitudinal con hilo de cabuya. Para el desarrollo de estas configuraciones se tomó en cuenta las fracciones volumétricas obtenidas en los ensayos preliminares a tracción. Se buscó conseguir los mismos valores de 0,15; 0,20; y 0,25. Por esta razón, para una fracción volumétrica de 0,15 la masa calculada fue de 1,60 g, para una fracción de 0,20 la masa fue de 2,20 g y para una fracción de 0,25 la masa fue de 2,70 g. Cada una de las probetas fue analizada dimensionalmente para comprobar si el espesor estaba dentro de lo establecido por la norma ASTM D 7264-07. Todas cumplieron con los requisitos de espesor establecidos en la norma, teniendo a la probeta con 2,70 g de fibra como la configuración de mayor fracción volumétrica incorporable.

Con el tejido normal se elaboraron probetas con cuatro, cinco, seis, siete y ocho capas de tejido. Esto resultó en diferentes fracciones volumétricas, como se puede observar en la Tabla 2.5, ya que cada capa de tejido tuvo un valor promedio en masa de 0,40 g, diferente al de las capas de tracción. Cada una de las probetas fue analizada dimensionalmente para comprobar si el espesor estaba dentro de lo establecido por la norma ASTM D 7264-07. Todas cumplieron con los requisitos de espesor establecidos en la norma, teniendo a la probeta con ocho capas de tejido en el límite de espesor, por lo que esta configuración fue la de mayor fracción volumétrica añadible a la matriz. Cabe recalcar que la mayor

fracción obtenida en este caso es de 0,30 a diferencia de la de tracción que fue de 0,34.

## **2.3. CARACTERIZACIÓN DE HILOS Y TEJIDOS DE CABUYA**

Es importante caracterizar la fibra de cabuya, tanto en hilo como en tejido para tener una idea clara de las propiedades del material con el que se está trabajando. En el mercado local existen diferentes tipos de hilos y tejidos de cabuya; por esto es necesario realizar una caracterización morfológica que permita diferenciarlos entre sí. Seguidamente, a las mejores opciones de refuerzo caracterizarlas mecánicamente para así obtener su comportamiento frente a la tracción.

Dentro de la caracterización de los hilos y tejidos de cabuya también se debe determinar su densidad, ya que puede existir variación con respecto al dato bibliográfico de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . El procedimiento se lo realiza experimentalmente a partir del material compuesto ya elaborado, pero previamente se debe conocer el valor de densidad de la resina poliéster usada como matriz del compuesto. El procedimiento seguido con este fin se describe a continuación.

### **2.3.1. DENSIDAD DE RESINA POLIÉSTER**

Para calcular la densidad del hilo y el tejido de cabuya es de vital importancia conocer la densidad de la matriz. En la ficha técnica de la resina ANDERPOL 859 no se encuentra definido el valor de densidad, por lo que se elaboró una probeta para cumplir este fin. La probeta elaborada resultó con las dimensiones que se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Dimensiones de la probeta de resina poliéster.

<b>Espesor (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Largo (mm)</b>
19,41	117,47	127,38

Se tomaron varios datos de espesor, ancho y largo, y mediante el producto de los promedios se obtuvo el volumen total de la probeta. Este volumen junto con la masa del elemento permiten obtener el valor de densidad del poliéster. La probeta utilizada se puede observar en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Probeta de resina poliéster.

El volumen calculado fue de  $290,37 \text{ cm}^3$ . Luego, utilizando la balanza digital electrónica se obtiene el valor de masa de la probeta desarrollada. El valor obtenido fue de  $385,5 \text{ g}$ . Con los valores de masa y volumen se puede calcular la densidad de la matriz poliéster. La densidad resultó de  $1,20 \text{ g/cm}^3$ . Cabe mencionar que la probeta fue obtenida con las cantidades de los componentes mencionados en la Tabla 2.3.

### **2.3.2. CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DE HILOS DE CABUYA**

La caracterización dimensional de hilos es muy importante dentro del proyecto para tener una base de diferenciación entre ellos. Los hilos de cabuya varían de acuerdo a su diámetro. En el mercado local se pueden encontrar dos tipos diferentes de hilos que han sido llamados hilo grueso e hilo fino, debido a la diferencia de diámetros que poseen. En la Tabla 2.7 se encuentran los valores de los diámetros respectivos.

Tabla 2.7. Diámetros de hilos de cabuya.

Hilo	Diámetro (mm)
Grueso	1,5
Fino	0,9

Se puede observar que el hilo grueso posee un diámetro de 1,5 mm mientras que el hilo fino tiene un diámetro de 0,9 mm. El hilo grueso al tener un diámetro de dimensión tan grande, resulta inútil en la elaboración de probetas, ya que su gran tamaño evita que sea procesado dentro de los moldes, sobre todo en los de flexión. Por esta razón, no fue tomado en cuenta dentro de los ensayos preliminares. Otro factor es que debido a su gran diámetro las probetas obtenidas probablemente resultarían con espesores muy grandes que estarían por fuera de los valores normalizados. Estas razones son las que dirigieron el estudio hacia el hilo de cabuya fino como refuerzo del material compuesto.

Los diferentes hilos se pueden observar a continuación en la Figura 2.18.

**(a)****(b)**

Figura 2.18. Hilo de cabuya: (a) grueso; (b) fino.

### 2.3.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE HILOS DE CABUYA

La caracterización mecánica se realiza con la finalidad de conocer exactamente el comportamiento del hilo de cabuya bajo cargas de tracción. Esta caracterización se la realizó al hilo fino, el mismo que fue seleccionado como refuerzo longitudinal entre los dos diferentes tipos de hilos del mercado. La norma utilizada fue la ASTM D3822-07, que indica el procedimiento para realizar ensayos de tracción a hilos de fibra natural. La norma menciona que para determinar la resistencia a la tracción de un hilo se deben ensayar un total de 20 especímenes de igual longitud, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Resistencia a la tracción de hilo de cabuya.

Probeta #	Fuerza (N)	Probeta #	Fuerza (N)	Probeta #	Fuerza (N)	Probeta #	Fuerza (N)
1	83,333	6	83,333	11	128,333	16	100,833
2	74,166	7	112,500	12	58,333	17	94,166
3	60,833	8	85,833	13	113,333	18	65,000
4	95,833	9	92,500	14	111,666	19	88,333
5	64,166	10	105,000	15	70,000	20	52,500
<b>Promedio</b>		87 N		<b>Desviación estándar</b>		21,18 N	

En la tabla anterior se puede apreciar la fuerza con la que se produjo la falla de cada uno de los 20 diferentes hilos. El promedio de todos los valores indica la resistencia a la tracción del hilo de cabuya el cual es de 87 N equivalente a 8,87 kgf con una desviación estándar de 21,18 N. La desviación estándar es bastante grande, debido a la gran variación en los datos obtenidos de fuerza que son consecuencia de la variación del diámetro del hilo.

El ensayo a tracción en el hilo fino de cabuya se puede apreciar a continuación en la Figura 2.19.



Figura 2.19. Ensayo de tracción en hilo fino de cabuya.

#### 2.3.4. DENSIDAD DEL HILO FINO DE CABUYA

El hilo de cabuya está formado por una gran cantidad de fibras unidas entre sí mediante un proceso de torsión. Debido a este hecho, en el momento de utilizar el hilo como refuerzo puede quedar atrapada cierta cantidad de aire entre las fibras, por lo que la densidad de la fibra varía. Esta densidad del hilo de cabuya se puede obtener experimentalmente a partir del material compuesto desarrollado. Este cálculo es necesario para comprobar si los valores de fracción volumétrica de refuerzo obtenidos en los ensayos preliminares son correctos de acuerdo a la masa de fibra colocada.

Para realizar el cálculo se debe partir de la siguiente ecuación:

$$2.6$$

Reemplazando la Ecuación 2.1 del apartado 2.1 en la Ecuación 2.6 se tiene,

$$2.7$$

Ahora, si se divide la Ecuación 2.7 para :

2.8

De la Ecuación 2.8 se puede despejar la densidad de la fibra , obteniéndose:

2.9

Remplazando la Ecuación 2.4 en la Ecuación 2.9:

2.10

La Ecuación 2.10 presenta la densidad de la fibra en función de la fracción volumétrica de refuerzo, ya que el valor de densidad del compuesto se puede obtener con el volumen y la masa del producto final, y la densidad de la matriz se calculó en el acápite 2.3.1. De esta forma, con las Ecuaciones 2.5 y 2.10 se inició un proceso iterativo para encontrar la densidad del hilo de cabuya. Se asumió una densidad inicial de la fibra de  $1,30 \text{ g/cm}^3$  y se ingresó en la Ecuación 2.5. Se obtuvo un valor de fracción volumétrica de 0,24. Este valor se remplazó en la Ecuación 2.10 y así resultó un valor de densidad de  $0,65 \text{ g/cm}^3$ . Este nuevo valor de densidad se remplazó en la Ecuación 2.5 para dar secuencia al proceso iterativo. De esta manera, el proceso continuó hasta que el valor inicial de densidad ingresado en la Ecuación 2.5 resultó igual al valor calculado con la Ecuación 2.10, es decir que .Al final se obtuvo la densidad del hilo de cabuya con un valor de  $0,83 \text{ g/cm}^3$ .

Los valores del proceso iterativo se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Valores del proceso iterativo en el cálculo de la densidad del hilo de cabuya.

1,3	0,23	0,61
0,61	0,49	0,93
0,93	0,32	0,78
0,78	0,38	0,85
0,85	0,35	0,82
0,82	0,36	0,83
<b>0,83</b>	0,36	<b>0,83</b>

La probeta utilizada para este cálculo se puede observar en la Figura 2.20.

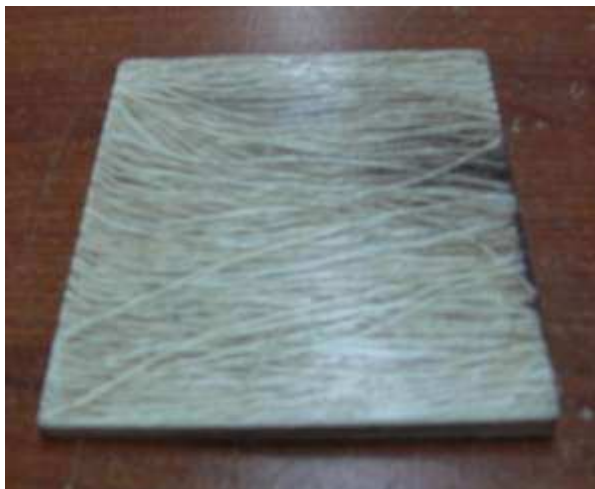


Figura 2.20. Probeta de material compuesto reforzado con hilo de cabuya.

Las dimensiones, masa, volumen y densidad de la probeta se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Dimensiones, masa, volumen y densidad de la probeta reforzada con fibra de cabuya.

<b>Probeta de material compuesto de resina poliéster reforzada con hilo de cabuya</b>			
<b>Largo (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Espesor (cm)</b>	
11,94	13,02	0,82	0,71
11,93	12,99	0,78	0,69
11,94	12,99	0,70	0,68
11,94	13,00	0,66	0,67
11,96	13,01	0,63	0,73
<b>Promedio</b>			
<b>11,94</b>	<b>13,00</b>	<b>0,71</b>	
<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
109,89	117,10	1,07	

### 2.3.5. CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DE TEJIDOS DE CABUYA

La caracterización dimensional de los tejidos es indispensable para diferenciar un tejido de otro. En este caso, la caracterización se realiza de acuerdo al número de hilos por unidad de longitud en las direcciones longitudinal y transversal. En el mercado local se pueden encontrar tres tipos de tejido de cabuya, el grueso, el



normal y el fino. En la Tabla 2.11 se pueden apreciar los valores del número de hilos de los diferentes tejidos.

Tabla 2.11. Caracterización dimensional de tejidos de cabuya.

Tipo de Tejido	Dirección de medición	
	Longitudinal	Transversal
	hilos/cm	hilos/cm
Grueso	1,87	2,50
Normal	4,80	4,53
Fino	4,60	5,13

Los diferentes tejidos presentes en el mercado se pueden apreciar en la Figura 2.21.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.21. Tipos de tejido de cabuya: (a) tejido grueso; (b) tejido normal; (c) tejido fino.

### 2.3.6. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE TEJIDOS DE CABUYA

La caracterización mecánica se realiza con la finalidad de conocer exactamente el comportamiento del tejido de cabuya bajo cargas de tracción. La caracterización se la realizó al tejido normal, ya que fue el seleccionado como refuerzo entre los diferentes tejidos del mercado. La norma utilizada fue la ASTM D5034-10, que permite determinar la resistencia a la tracción del tejido mediante un proceso definido. Este ensayo fue realizado en el Centro Textil Politécnico bajo el informe No.CTP-IT-2011-09-93, que se lo puede observar en el ANEXO 1. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Resistencia a la tracción de tejido normal de cabuya.

Longitudinal		Transversal	
Fuerza de rotura (kgf)	Elongación a la rotura (%)	Fuerza de rotura (kgf)	Elongación a la rotura (%)
33,57	3,0	31,31	7,6
33,41	3,3	27,27	5,9
29,29	2,4	26,22	6,8
Promedio			
32,09	2,9	28,27	6,8

En la tabla anterior se pueden observar los valores de fuerza necesaria para llevar a la rotura a tres diferentes muestras de tejido, así como también la elongación, tanto en la dirección longitudinal como en la transversal. Además, se pueden apreciar los valores promedio que indican la resistencia a la tracción del tejido de cabuya que son: en la sección longitudinal de 32,09 kgf equivalente a 314,7 N con una elongación del 2,9%, y en la sección transversal de 28,27 kgf equivalente a 277,2 N con una elongación del 6,8%.

### 2.3.7. DENSIDAD DE TEJIDO NORMAL DE CABUYA

El tejido de cabuya está formado por una gran cantidad de hilos entrelazados para formar la trama y urdimbre. Por esta razón, el cálculo de la densidad es similar al del hilo de cabuya obtenido experimentalmente a partir del material compuesto desarrollado. Este cálculo es necesario para comprobar si los valores de fracción

volumétrica de refuerzo obtenidos en los ensayos preliminares son correctos de acuerdo a la masa de fibra tejida colocada. Para determinar la densidad del tejido normal de cabuya se realizó el mismo cálculo iterativo desarrollado en el acápite 2.3.3. Se asumió un valor de densidad inicial de la fibra de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , obtenido como dato bibliográfico y se ingresó en la Ecuación 2.5. Se obtuvo un valor de fracción volumétrica de refuerzo de 0,42. Este valor se reemplazó en la Ecuación 2.10 y resultó un valor de densidad de fibra de  $1,29 \text{ g/cm}^3$ . Este nuevo valor de densidad se reemplazó en la Ecuación 2.5 en un proceso reiterativo. De esta forma, el proceso iterativo continuó hasta que el valor inicial ingresado en la Ecuación 2.5 resultó igual al valor calculado con la Ecuación 2.10, es decir, que .Al final se obtuvo la densidad del tejido de cabuya con un valor de  $1,29 \text{ g/cm}^3$ .

Los valores del proceso iterativo se muestran en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Valores del proceso iterativo en el cálculo de densidad del tejido de cabuya.

1,3	0,42	1,29
1,29	0,42	1,29

La probeta utilizada para este cálculo se puede observar en la Figura 2.22.

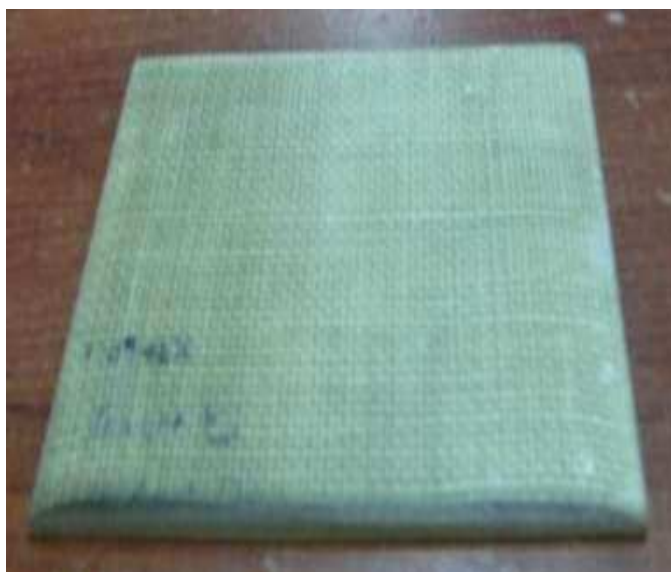


Figura 2.22. Probeta de material compuesto reforzado con tejido de cabuya.

Las dimensiones, masa, volumen y densidad de la probeta se muestran en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Dimensiones, masa, volumen y densidad de la probeta reforzada con tejido de cabuya.

<b>Probeta de material compuesto de resina poliéster reforzada con tejido de cabuya</b>			
<b>Largo (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Espesor (cm)</b>	
11,95	13,00	0,36	0,41
11,96	12,99	0,37	0,39
11,96	13,00	0,38	0,37
11,97	13,01	0,40	0,35
11,96	13,00	0,42	0,35
<b>Promedios</b>			
11,96	13,00	0,38	
<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
59,03	72,50	1,23	

## 2.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente apartado se muestra un procedimiento experimental basado en una estrategia metodológica que busca alcanzar los objetivos planteados. Se indican las actividades sistemáticamente desarrolladas para la caracterización del material compuesto, detallando el proceso de obtención de probetas. Seguidamente, se menciona la designación de las diferentes configuraciones a tracción, flexión e impacto con el objetivo de facilitar la forma de referirse a una determinada probeta. Finalmente, se presentan las diferentes orientaciones del refuerzo como hilo longitudinal, tejido orientado a 0° y orientado a 45°.

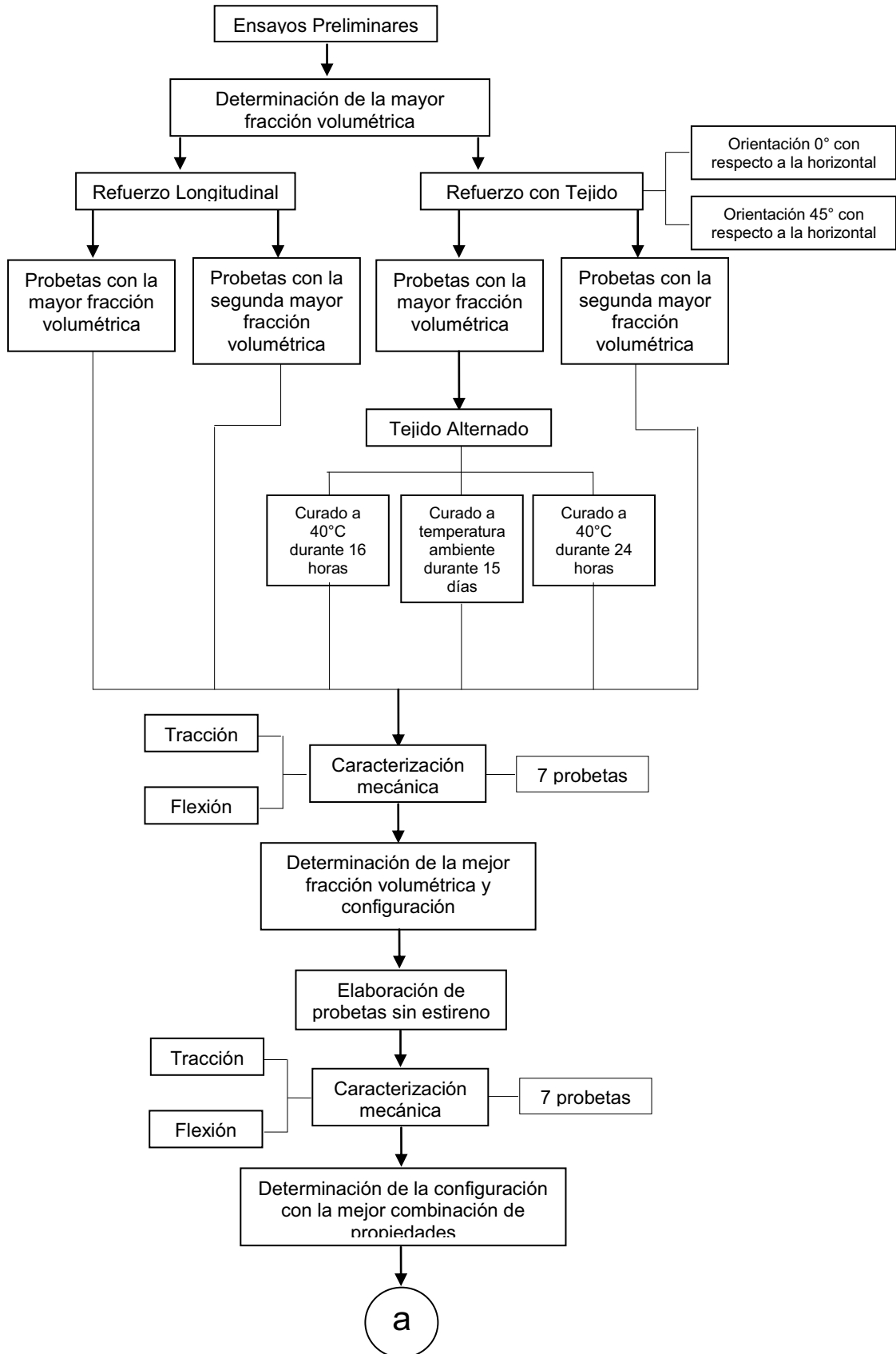
### 2.4.1. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA

La estrategia metodológica constituye la secuencia de actividades planificadas y organizadas sistemáticamente que permiten el cumplimiento de los objetivos planteados. En principio se realizaron los ensayos preliminares, primero para determinar la factibilidad de producción de probetas con un determinado refuerzo, y segundo para obtener los valores de mayor fracción volumétrica incorporable a

los compuestos. Seguidamente, se elaboraron probetas con las dos mayores fracciones volumétricas, tanto para el refuerzo longitudinal, como para el refuerzo con tejido. El refuerzo con tejido cuenta con la posibilidad de orientarlo a 0 y 45° con respecto a la horizontal, por lo que se decidió trabajar con ambas orientaciones por separado y luego unirlos en un mismo compuesto alternado. Aprovechando la configuración alternada, se decidió investigar el efecto de desarrollar diferentes curados: el primero a temperatura ambiente durante 15 días, el segundo a temperatura de 40°C durante 16 horas, y el tercero a temperatura de 40°C durante 24 horas. Posteriormente, se procedió con la caracterización mecánica mediante ensayos de tracción y flexión para determinar cuál de las dos fracciones volumétricas establecidas previamente para cada refuerzo ofrece mayor resistencia y además, definir la mejor configuración entre todas las examinadas.

Con los compuestos que mostraron el mejor comportamiento a tracción y flexión, se experimentó retirando el estireno como elemento añadido a la resina. De esta manera, estas nuevas probetas fueron caracterizadas mecánicamente a tracción y flexión para determinar si las propiedades se incrementaban o disminuían. Con toda la información recolectada, se determinó la configuración con la mejor combinación de propiedades. Esta configuración sirvió para elaborar probetas de impacto, en las cuales se varió la fracción volumétrica hasta obtener la máxima y luego fueron ensayadas mecánicamente mediante caída de dardo. Finalmente, se fabricó un prototipo de un producto existente en el mercado, al cual se evaluó con respecto a la aptitud funcional considerando sus dimensiones, peso y desempeño mecánico.

En la Figura 2.23 se esquematiza la metodología experimental seguida en el presente proyecto de investigación. Cabe mencionar que para cada configuración se ensayaron siete probetas con el fin de descartar los dos valores menos acordes a los resultados, de esta manera se concuerda con los cinco valores requeridos por la norma y se evita cualquier alteración no deseada en los resultados.



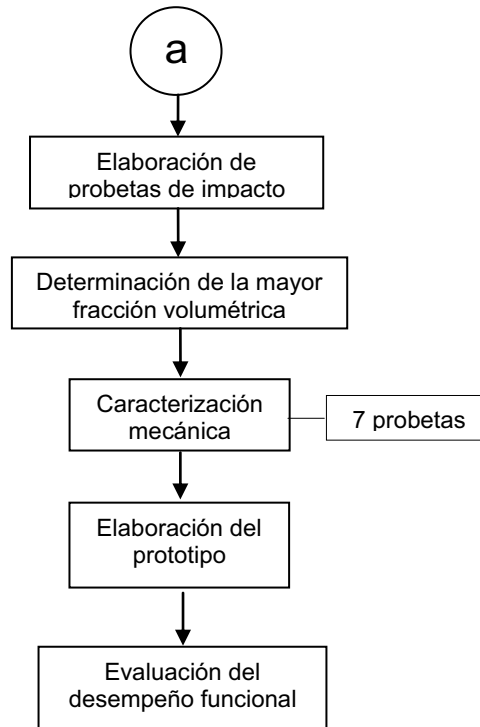


Figura 2.23. Esquema de estrategia metodológica.

#### 2.4.2. ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS

Para caracterizar el material mecánicamente se deben desarrollar diferentes probetas normalizadas para ensayos de tracción, flexión e impacto. Cada ensayo posee su propia norma que lo regula, siendo así para los ensayos de tracción la ASTM D 3039-08, para ensayos de flexión la ASTM D 7264-07 y para ensayos de impacto la ASTM D 5420-10. De esta manera, se deben seguir ciertos requerimientos para obtener las probetas adecuadas. Para esto se ha desarrollado un esquema de elaboración de probetas que se muestra en la Figura 2.24.

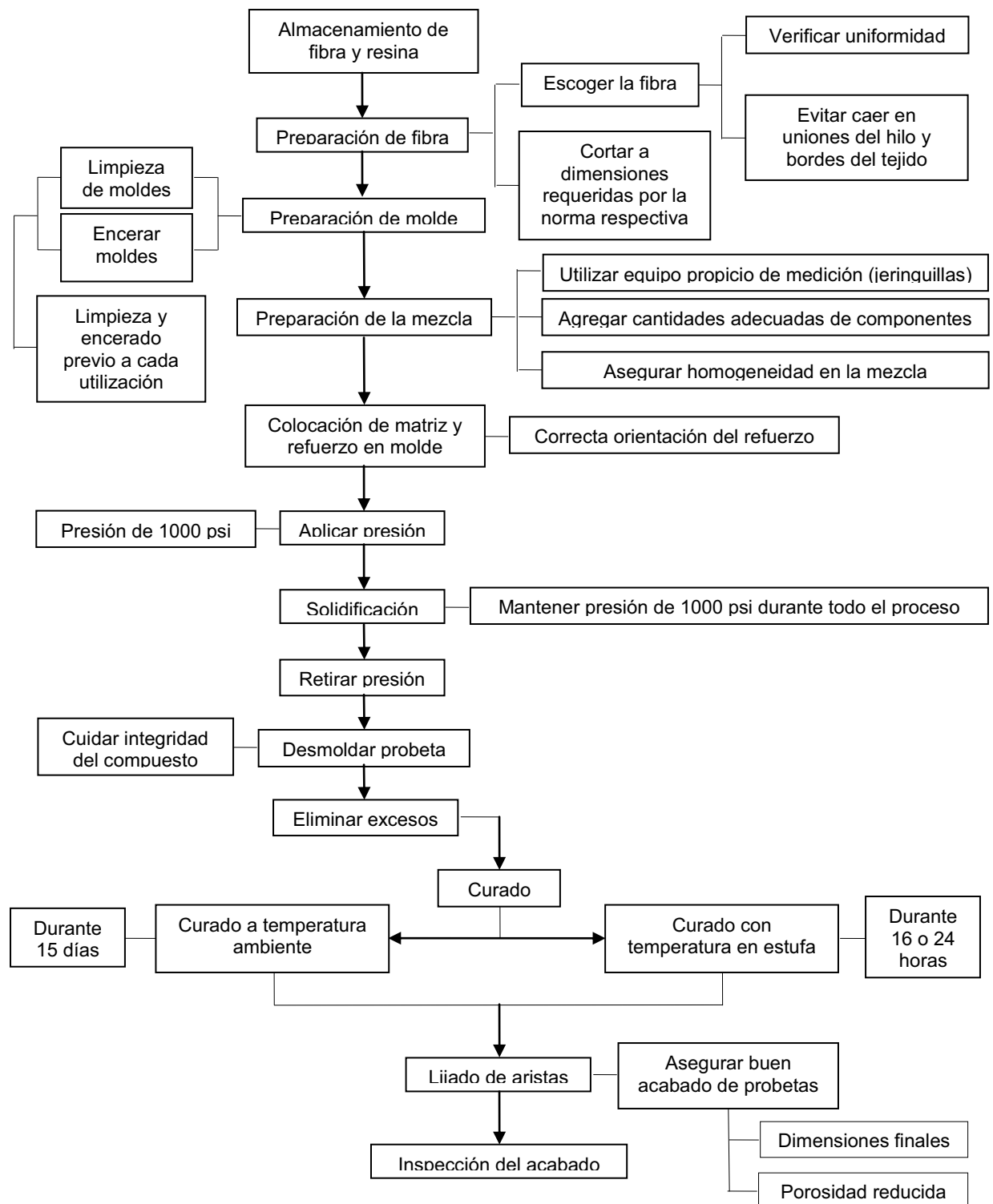


Figura 2.24. Esquema de elaboración de probetas.



Para complementar el proceso de elaboración, en la Figura 2.25 se puede apreciar el diagrama de flujo del proceso de elaboración de probetas.

#Tarea	Tarea	Operación				Tiempo	Notas
		Operación	Transporte	Inspección	Almacenamiento		
1	Almacenamiento de resina y fibras	○	□	△	-	Ambiente sin humedad	
2	Preparación de fibra	○	□	△	10 min	Depende del ensayo	
3	Preparación de molde	○	□	△	5 min	Limpieza y encerado	
4	Preparación de mezcla	○	□	△	10 min	Por cada tablero	
5	Colocación de matriz y refuerzo en molde	○	□	△	5 min	Correcta estratificación	
6	Aplicación de presión	○	□	△	1 min	Presión de 1000 psi	
7	Solidificación	○	□	△	80 min	Mantener la presión durante todo el proceso	
8	Retirar presión	○	□	△	1 min	Despresurizar prensa hidráulica	
9	Desmoldeo	○	□	△	10 min	Cuidar integridad del molde	
10	Eliminar excesos	○	□	△	1 min		
11	Curado	○	□	△	16 horas - 15 días	A 40°C o a temperatura ambiente	
12	Lijado de aristas	○	□	△	5 min	Lijado de las 8 aristas	
13	Inspección del acabado	○	□	△	1 min	Inspección visual	

Figura 2.25. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de probetas.

Dentro de los ensayos mecánicos constan los de tracción, flexión e impacto. Para la elaboración de probetas, previamente se definió la cantidad de resina que debe utilizarse dependiendo de la cantidad en masa de fibra de cabuya. Para esto se remojaron varias cantidades de fibra de cabuya en incrementos de un gramo en diferentes volúmenes de resina. En la Tabla 2.15 se puede apreciar la cantidad de resina necesaria para remojar una determinada cantidad de fibra. La palabra si indica que la fibra se humectó totalmente de resina, mientras que la palabra no sugiere mayor cantidad. De esta manera, se tiene una idea de la cantidad de poliéster que se debe ingresar en el molde para la elaboración de los diferentes compuestos.

Tabla 2.15. Cantidad de resina requerida para remojar una determinada cantidad de fibra.

Masa fibra (g)	Volumen Resina (cm <sup>3</sup> )	Remojo
1	20	Si
2	20	No
2	30	Si
3	30	No
3	40	Si
4	40	Si
5	40	No
5	50	Si
6	50	Si
7	50	Si

Dentro del proceso de elaboración de probetas el primer paso es la preparación del refuerzo. La preparación consistió primero en escoger la fibra adecuada, sea hilo o tejido, con la mejor apariencia y homogeneidad. Se debe recortar la fibra en hilo o tejido a las dimensiones adecuadas para procesarla dentro de los moldes. El molde debe de estar libre de impurezas con el fin de evitar residuos ajenos al material compuesto que pueden actuar como concentradores de esfuerzo dentro del material. Posteriormente se aplica cera desmoldante en toda la superficie para facilitar la extracción de la probeta una vez que se ha solidificado. En la Figura 2.26 se puede observar la aplicación de cera desmoldante.



Figura 2.26. Aplicación de cera desmoldante.

Una vez que el molde ha sido encerado se puede iniciar la preparación de la mezcla que será usada como matriz. Primero se coloca la cantidad requerida, según el caso, de resina poliéster en un recipiente. Seguidamente se añade, si es el caso, estireno en una cantidad del 10% del volumen de resina para disminuir la viscosidad del poliéster. En la mezcla resultante se adiciona el 0,5% de octoato de cobalto para iniciar el proceso de curado. Al introducir octoato de cobalto, la sustancia toma una coloración violeta, como se ve en la Figura 2.27.



Figura 2.27. Mezcla de resina, estireno y octoato de cobalto.

Cuando la mezcla alcanza una composición homogénea se agrega el 1% de MEKP para acelerar el proceso de curado y llegar a la solidificación rápidamente. Al incluir MEKP la resina adquiere una coloración panela como se observa en la Figura 2.28.



Figura 2.28. Mezcla final para matriz.

La mezcla resultante se debe colocar cuidadosamente en el molde conjuntamente con el refuerzo según la orientación requerida, como se observa en la Figura 2.29.



(a)



(b)

Figura 2.29. Estratificación del compuesto: (a) colocación de resina; (b) colocación de fibra de cabuya.

Se cierra el molde cuidadosamente, asegurándose que la tapa se encuentra en su sitio correctamente. En la Figura 2.30 se puede observar la colocación de la tapa en el molde lleno con resina y refuerzo.



Figura 2.30. Cierre de molde.

Una vez que el molde ha sido cerrado, debe ser colocado en la prensa hidráulica para la aplicación de presión. En la Figura 2.31 se observa la ubicación del molde en la prensa hidráulica.



Figura 2.31. Ubicación de molde en prensa hidráulica.

Luego de alrededor de 120 minutos, la probeta alcanza por completo la solidificación por lo que puede retirarse la presión para extraer la probeta del molde. La probeta desmoldada tiene ciertas imperfecciones, como rebabas en los filos, que deben retirados cuidadosamente con tijera o estilete. Este procedimiento se realiza luego que la probeta ha solidificado pero antes de que el curado se lleve a cabo por completo cuando la estructura todavía se encuentra blanda para que resulte más fácil realizar los cortes. Posteriormente, se realiza el curado para permitir que el material adquiera las mejores propiedades mecánicas. Finalmente, se requiere de un lijado de aristas y bordes para asegurar que la probeta obtenga un buen acabado superficial. Para una mayor comprensión del proceso de elaboración de probetas en el ANEXO 4 se puede apreciar una tabla con esta información.

### 2.4.2.1. Probetas para ensayos a tracción

Las probetas para ensayos de tracción fueron elaboradas en el molde de la Figura 2.2 (a), el mismo que permite obtener probetas con las dimensiones normalizadas. Se elaboraron doce diferentes configuraciones que fueron resultado de variar algunos parámetros como el refuerzo, el curado y el estireno. La matriz se fabricó con cantidades previamente determinadas de resina poliéster, estireno, octoato de cobalto y MEKP que se muestran en la Tabla 2.16. Se puede observar que la cantidad de resina poliéster y los demás elementos dependen de la fracción volumétrica de refuerzo que a su vez está directamente relacionada con la cantidad en masa de fibra y de la adición o no de estireno a la resina que posteriormente formará la matriz.

Tabla 2.16. Cantidad determinada de elementos constitutivos de la matriz para probetas de tracción.

Elemento	Hilo longitudinal		Tejido	
	Cantidad (ml)		Cantidad (ml)	
	$v_{fibra} = 0,23$	$v_{fibra} = 0,39$	$v_{fibra} = 0,28$	$v_{fibra} = 0,34$
Resina Poliéster	40	50	50	50
Estireno	4	5	5	5
Octoato de Cobalto	0,22	0,28	0,28	0,28
MEKP	0,44	0,55	0,55	0,55
Sin estireno				
Octoato de Cobalto	0,20	0,25	0,25	0,25
MEKP	0,40	0,50	0,50	0,50

Para facilitar la designación de las diferentes configuraciones realizadas se decidió elaborar una codificación de los compuestos desarrollados. Esta designación debe mencionar los aspectos más relevantes de cada configuración para de una manera rápida y sencilla conocer el material al que se refiere un determinado resultado. En la Tabla 2.17 se puede observar la designación y significado de las diferentes configuraciones a tracción.

Tabla 2.17. Designación y significado para probetas de tracción.

Configuración	Designación	Significado
1	L.E.15d.23%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,23
2	L.E.15d.39%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,39
3	T45°.E.15d.28%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,28
4	T45°.E.15d.34%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
5	T0°.E.15d.28%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,28
6	T0°.E.15d.34%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
7	A.E.15d.34%	Tejido alternado con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
8	A.E.16h.34%	Tejido alternado con estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,34
9	A.E.24h.34%	Tejido alternado con estireno, curado por 24 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,34
10	T0°.15d.34%	Tejido a 0° sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
11	A.15d.34%	Tejido alternado sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
12	A.16h.34%	Tejido alternado sin estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,34

La designación posee separaciones mediante puntos que indican las diferentes condiciones con las que se trabajó el material. Todo lo que se encuentre antes del primer punto se refiere al refuerzo utilizado, por ejemplo en la configuración 1 se tiene una “L” que se refiere al refuerzo longitudinal conformado por una serie de hilos finos de cabuya. Luego se puede observar la presencia o ausencia de la letra “E”, la cual evidencia la adición de estireno dentro de la matriz de poliéster, es decir que si se encuentra la letra “E” significa que el estireno estuvo presente en la formulación de la resina, caso contrario no se observará la letra. El siguiente segmento muestra el tipo de curado realizado, por ejemplo, en la configuración 8 se tiene “16h” que se refiere a un curado durante 16 horas utilizando una temperatura de 40°C. El último segmento se refiere a la fracción volumétrica de refuerzo utilizada para la elaboración del compuesto, por ejemplo, en la configuración 12 se observa “34%” lo cual indica que el material posee una fracción volumétrica de 0,34.



Las probetas para ensayos a tracción con las diferentes configuraciones se pueden observar en la Figura 2.32.





Figura 2.32. Probetas para ensayos a tracción.

#### 2.4.2.2. Probetas para ensayos a flexión

Las probetas para ensayos de flexión fueron elaboradas en el molde de la Figura 2.2(b) que permite obtener las probetas con las dimensiones normalizadas. Se elaboraron doce diferentes configuraciones que fueron resultado de variar algunos parámetros como el refuerzo, el curado y el estireno. La matriz se fabricó con cantidades previamente determinadas de resina poliéster, estireno, octoato de cobalto y MEKP que se muestran en la Tabla 2.18. Se puede observar que la cantidad de resina poliéster y los demás elementos dependen de la fracción volumétrica de refuerzo que a su vez está directamente relacionada con la cantidad en masa de fibra y de la adición o no de estireno como elemento constitutivo de la matriz

Tabla 2.18. Cantidad determinada de elementos constitutivos de la matriz por probeta de flexión.

Elemento	Hilo longitudinal		Tejido	
	Cantidad (ml)		Cantidad (ml)	
	$v_{\text{fibra}} = 0,23$	$v_{\text{fibra}} = 0,39$	$v_{\text{fibra}} = 0,26$	$v_{\text{fibra}} = 0,30$
Resina poliéster	30	40	40	40
Estireno	3	4	4	4
Octoato de cobalto	0,17	0,22	0,22	0,22
MEKP	0,33	0,44	0,44	0,44
<b>Sin estireno</b>				
Octoato de cobalto	0,15	0,20	0,20	0,20
MEKP	0,30	0,40	0,40	0,40

Para facilitar la designación de las diferentes configuraciones realizadas se decidió elaborar una codificación de los compuestos desarrollados. Esta designación debe mencionar los aspectos más relevantes de cada configuración para de una manera rápida y sencilla conocer el material al que se refiere un determinado resultado. En la Tabla 2.19 se puede observar la designación y significado de las diferentes configuraciones para ensayos a flexión.

Tabla 2.19. Designación y significado para probetas de flexión.

Configuración	Designación	Significado
1	L.E.15d.23%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,23
2	L.E.15d.39%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,39
3	T45°.E.15d.26%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,26
4	T45°.E.15d.30%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
5	T0°.E.15d.26%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,26
6	T0°.E.15d.30%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
7	A.E.15d.30%	Tejido alternado con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
8	A.E.16h.30%	Tejido alternado con estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,30
9	A.E.24h.30%	Tejido alternado con estireno, curado por 24 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,30
10	T0°.15d.30%	Tejido a 0° sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
11	A.15d.30%	Tejido alternado sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
12	A.16h.30%	Tejido alternado sin estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,30

En la tabla anterior se puede apreciar que las configuraciones realizadas para flexión son las mismas que las elaboradas a tracción pero con la diferencia de que las fracciones volumétricas de refuerzo son al utilizar tejido. Esta diferencia se debe a que la cantidad de fibra introducida dentro del compuesto se limita a un número entero que es la cantidad de capas de tejido. La máxima fracción volumétrica alcanzada para los tejidos en este caso es de 0,30 en lugar de 0,34 seguida de 0,26 en lugar de 0,28.

Las probetas para ensayos a flexión con las diferentes configuraciones se pueden observar en la Figura 2.33.

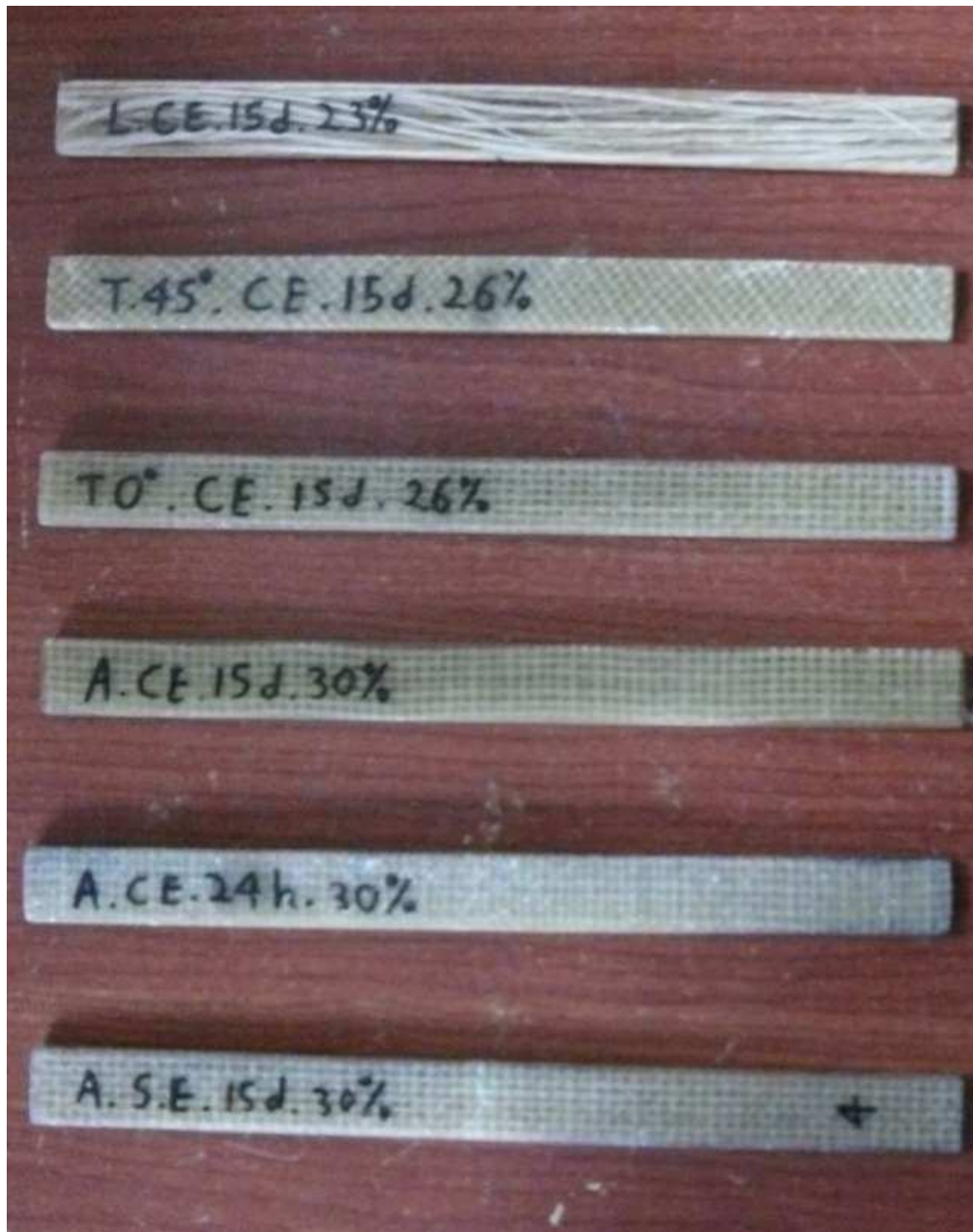




Figura 2.33. Probetas para ensayos a flexión.

#### 2.4.2.3. Probetas para ensayos a impacto

Para desarrollar las probetas de impacto se dispone de un molde que consta de cuatro perfiles en ángulo y dos vidrios templados que se puede observar en la parte (c) de la Figura 2.2. A partir de este molde se logra obtener un pequeño tablero cuadrado de material compuesto de 40 cm de lado, el cual es suficiente para extraer las 20 probetas de impacto necesarias según la norma. El tablero fue

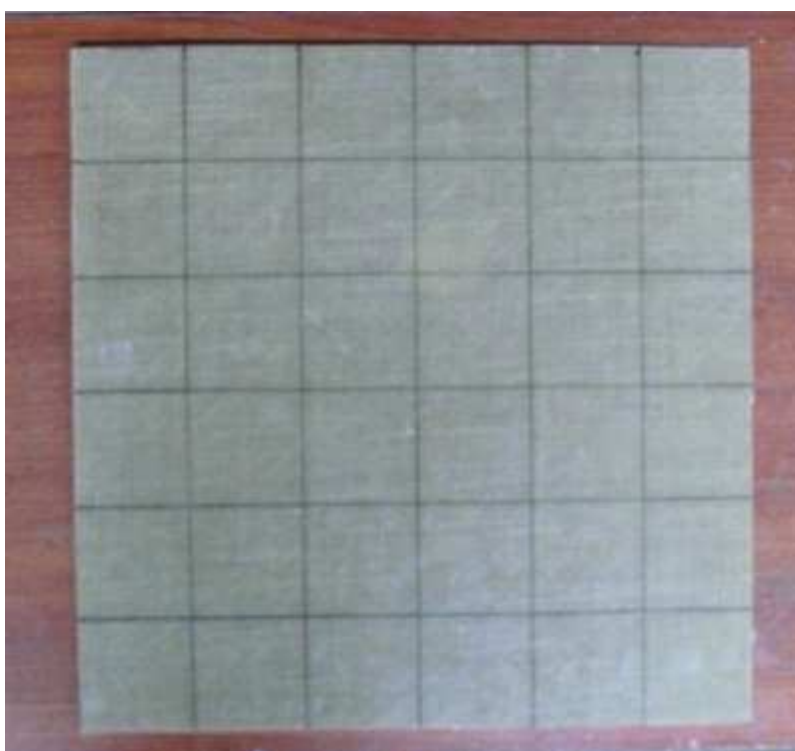
elaborado con la configuración que ofrece la mejor combinación de propiedades que resultó ser con tejido alternado, sin estireno y curado por 16 horas a temperatura de 40°C. La fracción volumétrica se obtuvo mediante ensayos preliminares para encontrar el mayor valor a ser utilizado, manteniendo las dimensiones de espesor descritas en la norma. Para este caso, el valor resultante fue de 0,26 con la presencia de tres capas de fibra, dos a 0° y una intermedia a 45°, con una masa de 36 gramos cada capa.

Los elementos constitutivos de la matriz para la elaboración de la matriz del tablero de impacto fueron previamente determinados y se muestran en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20. Cantidad determinada de elementos constitutivos de la matriz por probeta de impacto.

Elemento	Cantidad (ml)
Resina poliéster	450
Octoato de cobalto	2,25
MEKP	4,52

El tablero elaborado de donde se obtienen las probetas para ser ensayadas a impacto se puede apreciar en la Figura 2.34.



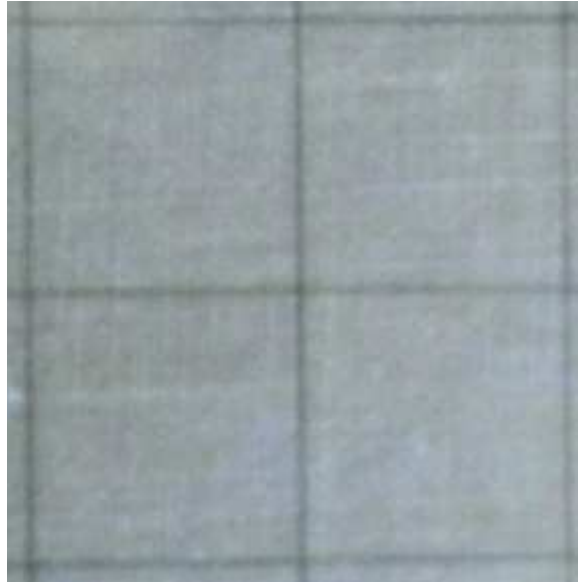


Figura 2.34. Tablero para extraer probetas de impacto.

El tablero elaborado permite obtener una gran cantidad de probetas con las dimensiones normalizadas para ensayo de impacto. De todas ellas se deben escoger los 20 mejores especímenes. Para esto, hay que valerse de la observación y de una caracterización dimensional. Las probetas normalizadas obtenidas se pueden observar en la Figura 2.35 mostrada a continuación.

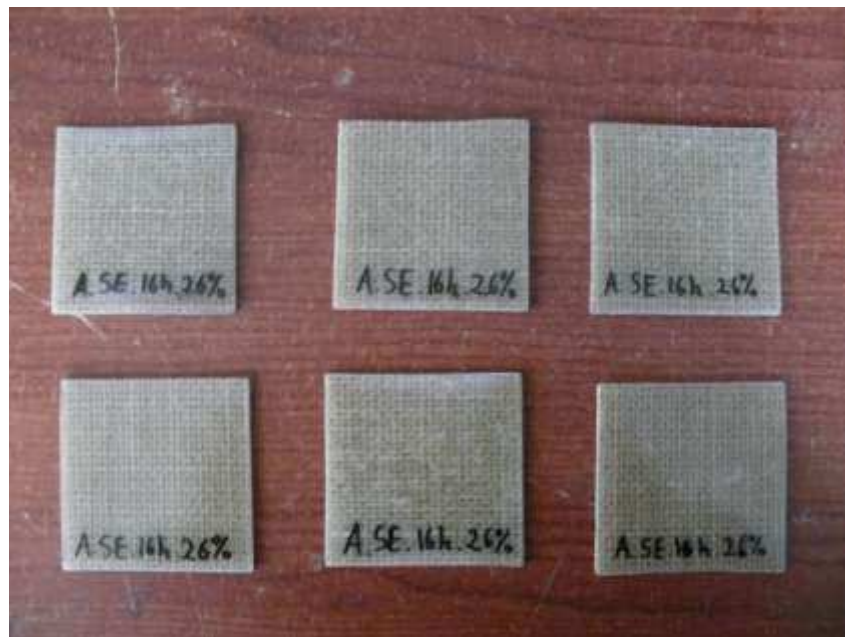
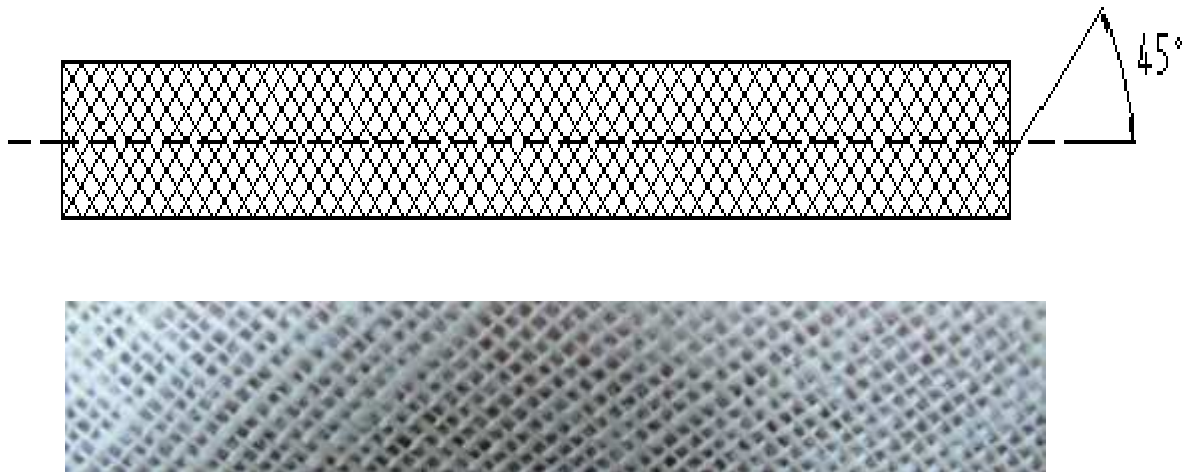
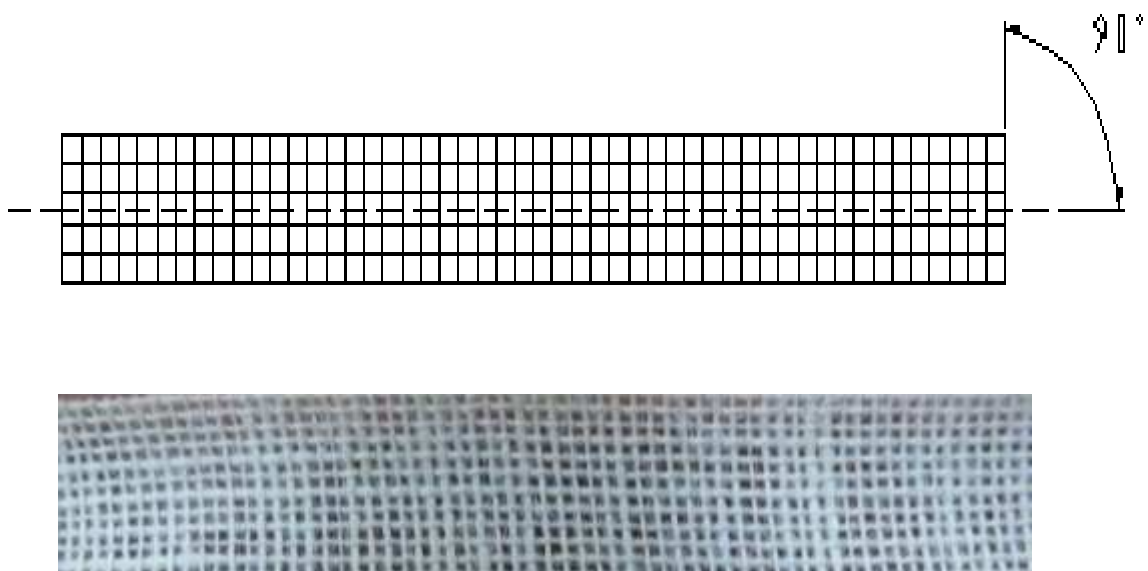


Figura 2.35. Probetas para ensayo de impacto.

Tanto para las probetas de tracción, flexión e impacto se ha hablado del tejido orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto al eje de las probetas. Para aclarar cualquier tipo de duda al respecto, se presenta en la Figura 2.36 los tejidos con las diferentes orientaciones.



(a)



(b)

Figura 2.36. Orientaciones del tejido plano: (a) tejido orientado a  $45^\circ$  con respecto al eje de las probetas; (b) tejido orientado a  $0^\circ$  con respecto al eje de las probetas.



## 2.5. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

La caracterización mecánica se realiza con el objetivo de determinar el comportamiento que presenta el material frente a diferentes tipos de carga. En el presente estudio se realizaron ensayos de tracción y flexión a todas las configuraciones desarrolladas según las normas correspondientes. Posteriormente, observando el compuesto que presentó el mejor comportamiento frente a los ensayos antes descritos se caracterizó bajo el ensayo normalizado de carga de impacto con caída libre de dardo.

### 2.5.1. CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Los ensayos de tracción se realizaron según la norma ASTM D 3039-08 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. La norma sugiere el ensayo de al menos cinco especímenes por cada configuración de refuerzo. Las pruebas se realizaron en la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25K-S UTM con una velocidad de 2 mm/min que es la indicada en la norma al igual que las dimensiones de las probetas que se muestran en la Tabla 2.21.

Tabla 2.21. Dimensiones de la probeta de tracción.

Dimensión	Valor
Longitud (mm)	250
Ancho (mm)	25 ± 1%
Espesor (mm)	2,5 ± 4%

En la norma se menciona el procedimiento que debe seguirse para obtener los valores de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad. El esfuerzo máximo a tracción debe ser calculado usando la Ecuación 2.11 y reportado con tres cifras significativas. El extensómetro debe ser colocado con una separación en el rango de 10 a 50 mm (0.5 a 2 in), para este caso se utilizó 2 in. El esfuerzo en diferentes puntos de la curva también debe ser considerado y para esto se utiliza la Ecuación 2.12.

$$F^{tu} = P^{max}/A \quad 2.11$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad 2.12$$

donde:

$F^{tu}$  = último esfuerzo a tracción, MPa;  $P^{max}$  = carga máxima antes de la falla, N;  $\sigma_i$  = Esfuerzo a tracción en el punto i, MPa;  $P_i$  = carga en el punto i, N;  $A$  = área transversal promedio,  $mm^2$ .

La deformación es determinada con el uso del extensómetro, el cual en este caso tiene una separación inicial de 50,8 mm equivalente a dos pulgadas. Para el cálculo se utiliza la Ecuación 2.13.

$$\epsilon_i = \delta_i/L_g \quad 2.13$$

donde:

$\epsilon_i$  = deformación en el punto i;  $\delta_i$  = desplazamiento del extensómetro en el punto i, mm;  $L_g$  = longitud inicial del extensómetro, mm.

El módulo de elasticidad se obtiene mediante los valores de esfuerzo y deformación en la parte recta de la curva con la Ecuación 2.14

$$E = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad 2.14$$

donde:

$E$  = módulo de elasticidad, GPa;  $\Delta\sigma$  = diferencia de esfuerzo aplicado entre dos puntos de deformación, MPa;  $\Delta\epsilon$  = diferencia de deformación entre dos puntos.

### 2.5.2. CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Los ensayos de flexión se realizaron según la norma ASTM D 7264-07 "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials". La norma sugiere el ensayo de al menos cinco especímenes por cada configuración de refuerzo. Las pruebas se realizaron en la máquina universal de ensayos Tinius

OlsenH25K-S UTM con una velocidad de 1 mm/min. Este valor está indicado en la norma, al igual que las dimensiones de las probetas que se muestran en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22. Dimensiones de la probeta de flexión.

Dimensión	Valor
Longitud (mm)	160
Ancho (mm)	13
Espesor (mm)	4

En la norma se menciona el procedimiento que debe seguirse para obtener los valores de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad. El esfuerzo máximo a tracción debe ser calculado usando la Ecuación 2.15 para el método de viga simplemente apoyada en dos puntos y cargada en el centro.

$$\sigma = \frac{P L}{4 b h^2} \quad 2.15$$

donde:

$\sigma$  = esfuerzo en la superficie externa en la mitad del tramo, MPa; P = carga aplicada, N; L = distancia entre apoyos, mm; b = ancho de viga, mm; h = espesor de viga, mm.

La deformación para el método de viga simplemente apoyada en dos puntos y carga central se calcula mediante la Ecuación 2.16.

$$\epsilon = \frac{\delta}{h} \quad 2.16$$

donde:

$\epsilon$  = deformación de la superficie externa, mm/mm;  $\delta$  = deflexión en el centro de viga, mm; h = espesor de viga, mm; L = distancia entre apoyos, mm.

El módulo de elasticidad se obtiene mediante los valores de esfuerzo y deformación en la parte recta de la curva con la Ecuación 2.17

$$E_f = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$$

2.17

donde:

$E_f$  = módulo de elasticidad, GPa;  $\Delta\sigma$  = diferencia de esfuerzo aplicado entre dos puntos de deformación, MPa;  $\Delta\varepsilon$  = diferencia de deformación entre dos puntos seleccionados.

El método utilizado es acorde al procedimiento A mencionado en la norma, el cual consiste en un ensayo de flexión a tres puntos. La distancia entre apoyos utilizada se encuentra en relación de 32:1 respecto del espesor de la probeta. En este caso, el espesor es de 4 mm, por consiguiente la distancia entre apoyos es de 128 mm y la carga aplicada justamente en el centro.

### 2.5.3. CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA AL IMPACTO

Los ensayos de impacto se realizaron según la norma ASTM D 5628-10 “Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)”. El método utilizado fue de caída de dardo con masa constante y altura variable. Consistió en encontrar la altura inicial a la que el material falla. A esta altura se aumenta un  $d_h$  si el material no falla y se disminuye un  $d_h$  si falla el material. Así se determina la altura a la que falla el 50% de las probetas. Las pruebas se realizaron en el equipo de caída de dardo disponible en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional. La norma sugirió el ensayo de veinte especímenes de las dimensiones que se observan en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23. Dimensiones de la probeta de impacto.

Dimensión	Valor
Longitud (mm)	$60 \pm 2$
Ancho (mm)	$60 \pm 2$
Espesor (mm)	$2 \pm 5\%$

Cabe mencionar que la probeta cuadrada descrita en la tabla anterior puede ser sustituida por una de forma circular con diámetro de 60 mm.

La altura media de impacto para producir la falla fue calculada usando la Ecuación 2.18. El signo negativo de la fórmula se usa cuando los eventos son fallas, y el signo positivo cuando los eventos no son fallas.

$$h = h_0 + d_h(A/N \pm 0.5) \quad 2.18$$

donde:

$h$  = altura media de impacto para producir falla, mm;  $h_0$  = altura mínima en la cual ocurre falla, mm;  $d_h$  = variación de altura, mm;  $A$  = sumatoria del número de fallas por la posición de falla;  $N$  = número total de fallas o no fallas, cualquiera que sea menor.

La energía absorbida por la probeta se obtiene con la Ecuación 2.19.

$$MFE = hwf \quad 2.19$$

donde:

$MFE$  = energía absorbida por la probeta, J;  $h$  = altura media de impacto para producir falla a masa constante, mm;  $w$  = masa del dardo, kg;  $f$  = factor de conversión a Joules,  $9,80665 \times 10^{-3}$ .

La desviación estándar de la altura media  $h$  se calcula mediante la Ecuación 2.20 mostrada a continuación.

$$s_h = 1,62d_h[B/N - (A/N)^2] + 0,047 d_h \quad 2.20$$

donde:

$s_h$  = desviación estándar, mm;  $B$  = Sumatorio del número de fallas por la posición de falla al cuadrado.

La desviación estándar de la energía absorbida por la probeta se obtiene mediante la Ecuación 2.21.

$$S_{MFE} = s_h w f \quad 2.21$$

donde:

$S_{MFE}$  = desviación estándar de la energía absorbida, J.

## 2.6. OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO

Para obtener el prototipo a ser realizado se debe llevar a cabo un procedimiento definido que se describe en este apartado. Inicialmente, se realiza un análisis funcional del material en donde se consideran diferentes características del compuesto para conocer los puntos fuertes y débiles del mismo. Seguidamente se mencionan diferentes alternativas de prototipos a fabricarse, los cuales se basan en los puntos fuertes del material. Una vez indicadas las alternativas se desarrolla el método ordinal de criterios ponderados, el cual permite seleccionar la alternativa que mejor se adapte a los parámetros de ponderación. Finalmente, se describe detalladamente el procedimiento de fabricación del prototipo ganador.

### 2.6.1. ANÁLISIS FUNCIONAL

Este análisis es realizado con el objetivo de identificar las fortalezas y debilidades del material para de esta manera direccionar el estudio hacia el prototipo más adecuado según las propiedades obtenidas.

A continuación se listan diferentes las características a ser analizadas:

- (i) **Apariencia del material:** La resina poliéster en su estado natural posee la propiedad de transparencia que se pierde al introducir el refuerzo de fibra natural. Sin embargo, la apariencia que adopta resulta muy agradable a la vista al adquirir un aspecto natural con hilo y tejido de cabuya.
- (ii) **Costo del material:** La resina poliéster insaturada es un material económico de amplia compra-venta en el mercado. A esto se le suma el hecho de que el refuerzo es fibra de cabuya, el cual es un material de

gran comercialización en el mercado local para uso artesanal, pero posee un costo elevado debido a que tiene un proceso de lavado, secado, hilado y tejido. Su costo puede ser reducido si se adquiere directamente de la distribuidora en grandes cantidades.

- (iii) **Resistencia:** Durante el desarrollo de este proyecto se evaluaron las propiedades del material determinándose que al introducir el refuerzo de cabuya se mejoran las propiedades de tracción, flexión e impacto así como también la rigidez. Sin embargo, la energía absorbida por impacto resulta relativamente baja, sobre todo frente al refuerzo de fibra de vidrio, por lo que debe descartarse la posibilidad de fabricar elementos sometidos a grandes impactos como partes de automóviles.
- (iv) **Método de procesamiento:** Esta característica es muy importante ya que existen grandes limitaciones en el método de procesamiento, sobre todo al obtener elementos de grandes tamaños. La aplicación de presión es el mayor problema ya que no se cuenta con el equipo para realizarlo, por lo que se debe improvisar colocando diferentes pesos sobre el molde.
- (v) **Versatilidad geométrica:** Es vital analizar esta característica, ya que con el método de procesamiento utilizado no se consiguen formas complejas con radios de curvatura pequeños o excesivos cambios de secciones.
- (vi) **Taladrabilidad:** El material es de muy fácil mecanización puesto que no ofrece resistencia a la fuerzas de corte de las máquinas herramientas. La taladrabilidad se refiere a la facilidad que presenta el material al paso de la broca que realiza orificios en el material, los cuales permitirán obtener uniones mediante pernos, tornillos o remaches.
- (vii) **Comportamiento frente a la humedad:** Los plásticos tienen una gran resistencia a la humedad por su naturaleza hidrofóbica. El poliéster

cubre completamente a la fibra natural, lo que hace que el material compuesto cabuya-poliéster presente también gran resistencia a la humedad.

- (viii) **Comportamiento frente a altas temperaturas:** El material no debe exponerse a temperaturas mayores a 85°C ya que pueden existir problemas de distorsión.

Una vez analizadas las características del material se realiza una ponderación para saber que tan bueno o que tan malo es el material respecto a un parámetro. La ponderación realizada se puede observar en la Tabla 2.24 mostrada a continuación.

Tabla 2.24. Valoración de las características del material.

CARACTERÍSTICAS	PONDERACIÓN				
	1	2	3	4	5
Apariencia del material				X	
Costo del material			X		
Resistencia		X			
Método de procesamiento	X				
Versatilidad geométrica		X			
Taladrabilidad					X
Comportamiento frente a la humedad					X
Comportamiento frente a altas temperaturas		X			

donde:

1 = muy mala, 2 = mala, 3 = media, 4 = buena, 5 = muy buena

Como se puede observar, el material presenta muy buenas propiedades de resistencia a la humedad y taladrabilidad, la cuales deben ser aprovechadas en la fabricación del prototipo. En cuanto a la apariencia, la ponderación es buena lo que lleva a pensar que el material debe estar a la vista para poder apreciar la apariencia llamativa del tejido de cabuya. El método de procesamiento es considerado como la peor de las propiedades debido a las limitaciones de moldes y un equipo para la aplicación de presión, por lo que debe tomarse en cuenta que el prototipo no debe poseer dimensiones demasiado grandes. La forma no debe



ser muy compleja debido a la versatilidad geométrica ya que puede verse afectada la interfaz fibra-matriz.

### 2.6.2. POSIBLES PROTOTIPOS A REALIZARSE

Una vez identificadas y analizadas las características del material se listan las diferentes alternativas de los prototipos a realizarse. Estas opciones deben tomar en cuenta unos de los criterios más importantes que es el método de procesamiento, ya que este analiza la posibilidad de fabricación del prototipo. De esta manera, los prototipos a realizarse no deben tener formas demasiado complejas ni tamaños exagerados. También se debe aprovechar la llamativa apariencia del tejido natural debido a que posee el valor agregado del aspecto natural, por lo tanto el material compuesto debe estar a la vista del consumidor. Otro factor importante es la alta resistencia a la humedad, por lo que se debe procurar optar por prototipos donde exista el riesgo a derrame de fluidos como mesas, alacenas y muebles en general donde se produce el almacenamiento de botellas o recipientes con líquidos; o que mantengan exposición constante a la humedad como gabinetes y tinas de baño. Todo esto con el fin de aprovechar la mayor cantidad de cualidades del material. En la Tabla 2.25 se pueden apreciar las diferentes alternativas propuestas para la fabricación del prototipo.

Tabla 2.25. Alternativas para la fabricación de prototipo.

Alternativa	Descripción	Producto existente en el mercado
A1	Gabinete de baño	
A2	Mesa para exterior	

Alternativa	Descripción	Producto existente en el mercado
A3	Mostrador de vinos	
A4	Tina de baño para bebés	

### 2.6.3. MÉTODO ORDINAL DE CRITERIOS PONDERADOS PARA SELECCIÓN DE POSIBLES PROTOTIPOS A REALIZARSE

Se tienen varias alternativas para la fabricación del prototipo, por lo que se debe desarrollar el método ordinal de criterios ponderados para elegir la mejor de ellas. En este método se evalúan diferentes aspectos como funcionalidad, conformado, costo, vida útil y éxito en el mercado.

- (i) **Funcionalidad:** Se entiende como el aprovechamiento del material y sus propiedades en la forma de trabajar del prototipo.
- (ii) **Conformado:** Se debe evaluar la facilidad de conformado del material, ya que la geometría puede ser muy complicada de alcanzar.
- (iii) **Costo:** Se debe analizar el costo de fabricación del prototipo puesto que la fibra de cabuya tejida es altamente costosa.

- (iv) **Vida útil:** Debido a sus condiciones propias de ser un plástico termoestable, la resina poliéster es un material que no puede ser reciclado, por lo que el prototipo debe tener larga vida útil.
- (v) **Futuro éxito en el mercado:** Tomando en cuenta que se va a reemplazar un producto existente en el mercado, se debe analizar si el prototipo tiene potencial de éxito en futuras ventas dentro del mercado local.

En la Tabla 2.26 se muestra la valoración de los criterios de selección.

Tabla 2.26. Resultado de la valoración de los criterios de selección del prototipo.

Criterio	Funcionalidad	Conformado	Costo	Vida útil	Éxito mercado	$\Sigma+1$	pond.
<b>Funcionalidad</b>		0	1	0,5	0	2,5	0,17
<b>Conformado</b>	1		1	1	1	5,0	0,33
<b>Costo</b>	0	0		0	0,5	1,5	0,10
<b>Vida útil</b>	0,5	0	1		0	2,5	0,17
<b>Éxito mercado</b>	1	0	0,5	1		3,5	0,23
				Suma		15,0	1,00

donde:

- 1: si el criterio de las filas es superior que el de las columnas  
 0,5: si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas  
 0: si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Con la ponderación de cada criterio de selección se evalúan las diferentes alternativas multiplicándolas por los pesos específicos. Dicha valoración se desarrolla en las Tablas 2.27, 2.28, 2.29, 2.30, 2.31.

Las alternativas son las siguientes:

A1: Gabinete de baño

A2: Mesa para exterior

A3: Mostrador de vinos

A4: Tina de baño para bebés

Tabla 2.27. Peso específico del criterio de funcionalidad.

Funcionalidad	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	pond.
A1		0,5	0,5	0,5	2,5	0,22
A2	1		1	1	4,0	0,35
A3	0,5	0,5		0,5	2,5	0,22
A4	0,5	0,5	0,5		2,5	0,22
				Suma	11,5	1,00

Tabla 2.28. Peso específico del criterio de conformado.

Conformado	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	pond.
A1		0	0	1	2,0	0,20
A2	1		0,5	1	3,5	0,35
A3	1	0,5		1	3,5	0,35
A4	0	0	0		1,0	0,10
				Suma	10,0	1,00

Tabla 2.29. Peso específico del criterio de costo.

Costo	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	pond.
A1		0	0	0,5	1,5	0,15
A2	0,5		0	0	1,5	0,15
A3	1	1		1	4,0	0,40
A4	1	1	0		3,0	0,30
				Suma	10,0	1,00

Tabla 2.30. Peso específico del criterio de vida útil.

Vida útil	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	pond.
A1		0,5	0,5	1	3	0,30
A2	0,5		0,5	1	3	0,30
A3	0,5	0,5		1	3	0,30
A4	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1,00

Tabla 2.31. Peso específico del criterio de futuro éxito en el mercado.

Éxito mercado	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	pond.
A1		1	1	1	4	0,40
A2	0		0	1	2	0,20
A3	0	1		1	3	0,30
A4	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1,00

Los resultados del método de comparación de alternativas se pueden apreciar en la Tabla 2.32.

Tabla 2.32. Conclusión del método de selección de alternativas.

Conclusión	Funcionalidad	Conformado	Costo	Vida útil	Éxito mercado	$\Sigma$	Prioridad
A1	0,037	0,066	0,015	0,051	0,092	0,261	3
A2	0,060	0,116	0,015	0,051	0,046	0,288	2
A3	<b>0,037</b>	<b>0,116</b>	<b>0,040</b>	<b>0,051</b>	<b>0,069</b>	<b>0,313</b>	<b>1</b>
A4	0,037	0,033	0,030	0,017	0,023	0,140	4




En la tabla anterior se observa que las alternativas A2 y A3 alcanzaron la ponderación más elevada. Por este motivo ambas alternativas son una buena opción de prototipo. La prioridad 1 la tiene el mostrador de vinos y la prioridad 2 es la mesa para exterior. Debido a la escala de prioridades se decide fabricar la alternativa A3 que es la que alcanzó la más alta ponderación. Por lo tanto, el mostrador de vinos es el prototipo a realizarse.

#### 2.6.4. POSIBLES DISEÑOS A REALIZARSE

Dentro de la alternativa ganadora A3, debe considerarse diferentes diseños de mostradores de vinos tomando en cuenta diversos factores que aseguren la competitividad del producto adaptándose a las necesidades del mercado. De esta manera, se tomaron en cuenta varias condiciones de fabricación y montaje con el fin de conseguir un futuro éxito del producto en el mercado. También, dentro de la selección se tomaron en cuenta las principales ventajas y desventajas de cada

diseño que ayudaron a escoger el mejor de los diseños. Las alternativas de diseño se muestran en la Tabla 2.33.

Tabla 2.33. Alternativas de diseño.

<b>Alternativa</b>	<b>Diseño</b>
A (atractivo)	
B (práctico)	
C (clásico)	

## **2.6.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

### **2.6.5.1. Alternativa de diseño A (atractivo)**

#### **Ventajas**

- Es altamente estético.
- Su estructura curva es novedosa, lo que llama la atención del cliente.
- No es de grandes dimensiones lo que lo hace liviano y fácilmente transportable.

#### **Desventajas**

- No posee gran capacidad.
- No se puede dar inclinación a las botellas.
- No existe buena seguridad en las botellas.

### **2.6.5.2. Alternativa de diseño B (práctico)**

#### **Ventajas**

- Se puede dar inclinación a las botellas para asegurar el contacto del líquido con el corcho.
- Ofrece gran seguridad de sujeción de las botellas.
- Es la alternativa de menor tamaño, lo que la hace la más liviana y fácilmente transportable.
- Tiene dos posiciones de uso: vertical y horizontal.
- Es apilable para cuando se requiera almacenar mayor número de botellas.

#### **Desventajas**

- Individualmente no posee gran capacidad.
- En la posición vertical, no ofrece buena estabilidad.
- El acceso a la botella es únicamente desde su base.

### 2.6.5.3. Alternativa de diseño C (clásico)

#### Ventajas

- Ofrece gran estabilidad.
- Se puede almacenar un gran número de botellas.
- Fácilmente transportable.

#### Desventajas

- Al ser de grandes dimensiones, ocupa gran espacio.
- No es fácilmente transportable.
- Es la alternativa de mayor tamaño, lo que la hace la más pesada.

### 2.6.6. MÉTODO ORDINAL DE CRITERIOS PONDERADOS PARA SELECCIÓN DE POSIBLES DISEÑOS A REALIZARSE

Se tienen varias alternativas de diseño para la fabricación del prototipo por lo que para elegir la mejor de ellas se debe desarrollar el método ordinal de criterios ponderados. En este método se evalúan diferentes aspectos de diseño como estabilidad, peso, factibilidad de fabricación, estética, costo de producción, tiempo de producción.

- (i) **Estabilidad:** Se entiende como la capacidad que posee un producto o sistema a mantenerse en equilibrio bajo la acción de cargas. Es decir, es la firmeza o seguridad que ofrece el elemento en funcionamiento.
- (ii) **Peso:** La tendencia en el diseño es obtener artículos livianos combinados con buena resistencia, por lo que se debe considerar el peso. Además, este criterio incide directamente en la maniobrabilidad y fácil transporte del producto.
- (iii) **Factibilidad de fabricación:** Este criterio es el más importante, ya que aquí se analiza la posibilidad de elaboración del producto. Se debe tomar en cuenta el método de procesamiento y el equipo disponible



dentro de la fabricación, ya que elementos de formas complejas presentarían grandes dificultades.

- (iv) **Estética:** Para asegurar la acogida dentro del mercado, este debe ser llamativo a la vista del consumidor. De esta manera se consigue un futuro éxito en el mercado con un producto altamente estético.
- (v) **Costo:** En una sociedad capitalista el costo es un criterio de vital importancia. Cuando existen varios artículos capaces de cumplir una misma función, el costo es un factor decisivo para la compra del producto. Por lo tanto, este es un factor que debe ser tomado en consideración.
- (vi) **Tiempo de producción:** Se entiende como el tiempo total que demora la fabricación desde que inicia la preparación del material compuesto hasta que el producto se encuentra terminado. La importancia de este criterio radica en el hecho que con menor tiempo de producción se tiene un menor costo de fabricación, en cuanto a mano de obra y energía, y se puede elaborar una mayor cantidad de producto terminado.

En la Tabla 2.34 se muestra la valoración de los criterios de selección.

Tabla 2.34. Resultado de la valoración de los criterios de selección del diseño.

Criterio	Estabilidad	Peso	Factibilidad de fabricación	Estética	Costo	Tiempo de producción	$\Sigma+1$	pond.
<b>Estabilidad</b>		1	0	1	1	1	5,0	0,24
<b>Peso</b>	0		0	1	0	0	2,0	0,10
<b>Factibilidad de fabricación</b>	1	1		1	1	1	6,0	0,29
<b>Estética</b>	0	0	0		0	0	1,0	0,05
<b>Costo</b>	0	1	0	1		0,5	3,5	0,17
<b>Tiempo de producción</b>	0	1	0	1	0,5		3,5	0,17
				Suma			21,0	1,00

donde:

- 1: si el criterio de las filas es superior que el de las columnas  
 0,5: si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas  
 0: si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Con la ponderación de cada criterio de selección se evalúan las diferentes alternativas multiplicándolas por los pesos específicos. Dicha valoración se desarrolla en las Tablas 2.35, 2.36 2.37, 2.38, 2.39, 2.40.

Tabla 2.35. Peso específico del criterio de estabilidad.

<b>Estabilidad</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	$\Sigma+1$	<b>pond.</b>
<b>A</b>		1	0	2	0,33
<b>B</b>	0		0	1	0,17
<b>C</b>	1	1		3	0,50
			Suma	6	1,00

Tabla 2.36. Peso específico del criterio de peso.

<b>Peso</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	$\Sigma+1$	<b>pond.</b>
<b>A</b>		0	1	2	0,33
<b>B</b>	1		1	3	0,50
<b>C</b>	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 2.37. Peso específico del criterio de factibilidad de fabricación.

<b>Fact. de fab.</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	$\Sigma+1$	<b>pond.</b>
<b>A</b>		0	0	1	0,17
<b>B</b>	1		1	3	0,50
<b>C</b>	1	0		2	0,33
			Suma	6	1,00

Tabla 2.38. Peso específico del criterio de estética.

Estética	A	B	C	$\Sigma+1$	pond.
A		1	1	3	0,50
B	0		1	2	0,33
C	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 2.39. Peso específico del criterio de costo.

Costo	A	B	C	$\Sigma+1$	pond.
A		0	1	2	0,33
B	1		1	3	0,50
C	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 2.40. Peso específico del criterio de tiempo de producción.

Tiempo de pr.	A	B	C	$\Sigma+1$	pond.
A		0	1	2	0,33
B	1		1	3	0,50
C	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

Los resultados del método de comparación de alternativas de diseño se pueden apreciar en la Tabla 2.41.

Tabla 2.41. Conclusión del método de selección de alternativas de diseño.

Conclusión	Estabilidad	Peso	Factibilidad de fabricación	Estética	Costo	Tiempo de producción	$\Sigma$	Prioridad
A	0,079	0,033	0,049	0,025	0,056	0,056	0,299	2
B	<b>0,041</b>	<b>0,050</b>	<b>0,145</b>	<b>0,017</b>	<b>0,085</b>	<b>0,085</b>	<b>0,422</b>	<b>1</b>
C	0,120	0,017	0,096	0,009	0,029	0,029	0,270	3

En la tabla anterior se observa que la alternativa B (práctico) alcanzó la ponderación más elevada, por lo que tiene la prioridad 1 en el diseño de mostrador de vinos y es el prototipo a realizarse.

## 2.6.7. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

### (i) Ensayos preliminares

Para la fabricación del prototipo se decidió realizar ensayos preliminares con el fin de obtener la fracción volumétrica que ofrezca las mejores propiedades para el procesamiento y costo del producto. Se realizaron varias pruebas en el molde (c) de la Figura 2.2, variando la cantidad de matriz y refuerzo para conseguir diferentes espesores en el material compuesto con el menor desperdicio de resina poliéster. Los espesores logrados fueron de 3, 5 y 7 mm. En la Tabla 2.42 se puede apreciar las cantidades utilizadas de resina, octoato de cobalto y MEKP y fibra tejida, así como también la fracción volumétrica de refuerzo.

Tabla 2.42. Cantidades de resina, octoato de cobalto, MEKP y fibra tejida utilizados para obtener diferentes espesores en el compuesto y la fracción volumétrica.

Esesor (cm)	Fibra tejida # de capas	Fibra tejida (g)	Fracción volumétrica	Resina poliéster (cm <sup>3</sup> )	Octoato de cobalto (cm <sup>3</sup> )	MEKP (cm <sup>3</sup> )
0,3	3	108	0,17	600	3	6
0,5	5	180	0,17	1000	5	10
0,7	7	252	0,17	1400	7	14

Se puede observar que la relación entre la cantidad de fibra y el espesor del compuesto es directamente proporcional, consiguiéndose mantener constante la fracción volumétrica de refuerzo en un valor de 0,17. El tercer compuesto, al tener un mayor espesor ofrece mayor resistencia y estabilidad en la construcción del prototipo, pero al mismo tiempo eleva el peso del producto y el costo ya que se necesita más cantidad de fibra como refuerzo, la cual posee un alto costo, y al mismo tiempo requiere mayor cantidad elementos. Por esta razón, desde el punto de vista económico, se presentan como mejor opción los compuestos de 3 y 5 mm para alcanzar mayor competitividad en el mercado.

### (ii) Diseño del prototipo

Del método ordinal de criterios ponderados se obtuvo que el diseño a realizarse sea el práctico, alternativa B. Partiendo de este diseño se realizaron cambios a la

apariencia inicial tomando en cuenta los moldes disponibles que son: (i) 40 x 40 cm, que fue el utilizado para obtener las probetas de impacto y los ensayos preliminares del prototipo y, (ii) 71 x 71 cm. En la Figura 2.37 se puede observar el molde de madera de 71 x 71 cm.



Figura 2.37. Molde de madera de dimensiones 71 x 71 cm.

Tomando en cuenta el tamaño del tablero obtenido en el molde de 71 x 71 cm se realizó el dimensionamiento del prototipo. El nuevo diseño tiene capacidad para 5 botellas de vino pero con la posibilidad de apilarse para el almacenamiento de un mayor número de botellas. Los agujeros para la base y el pico de las botellas están dispuestos de tal manera que ofrecen un ángulo de inclinación de  $8,5^\circ$  para asegurar la buena conservación del vino ya que el contacto con el corcho resulta indispensable para impedir la oxidación del mismo. De igual manera, el ángulo de inclinación ofrece mayor seguridad de las botellas dentro del mostrador. Esta inclinación está presente en cualquiera de las dos posiciones que ofrece el prototipo que son: horizontal y vertical. En la Figura 2.38 se puede observar el prototipo en ambas posiciones.

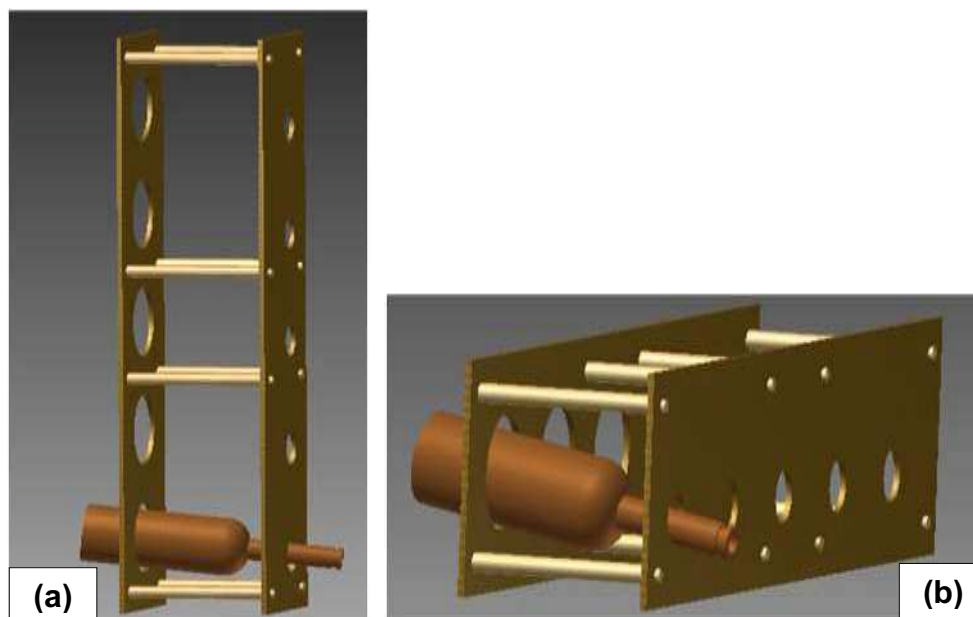


Figura 2.38. Diseño del prototipo en las posiciones: (a) horizontal; (b) vertical.

En la Figura 2.39 se puede observar un gráfico con dos prototipos apilados para aumentar la capacidad de almacenamiento. Cabe mencionar que el apilamiento únicamente se da lugar en la posición horizontal y puede ser realizado en el mismo sentido o en sentido contrario como se observa en la Figura 2.39.

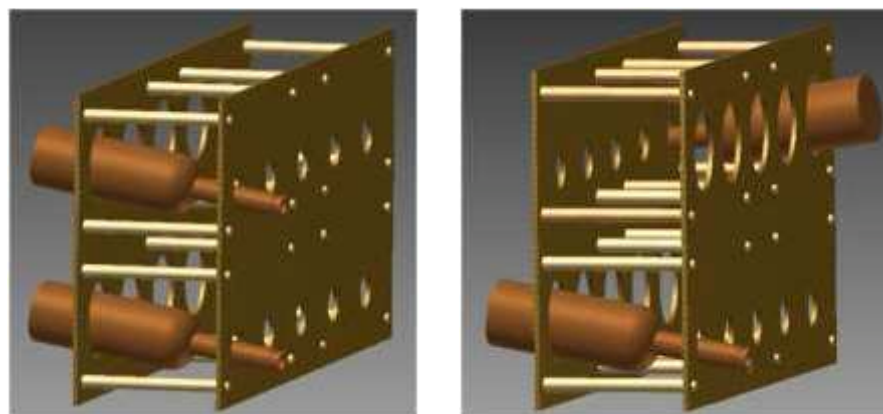






Figura 2.39. Prototipos apilados.

### (iii) Proceso de fabricación del prototipo






Una vez definido el diseño se procede con la fabricación del prototipo. En la Tabla 2.43 se presenta el procedimiento a seguir para la elaboración del prototipo mediante moldeo por compresión. Es necesario indicar que estos procesos y sus

valores han sido expuestos en los acápites 2.2.1 y 2.2.2 de este estudio. Por lo tanto, al momento de aplicar el procedimiento, es necesario revisar el contenido de estos acápites para aplicar los cálculos de fracción volumétrica y elaboración de probetas.

Tabla 2.43. Proceso de fabricación del prototipo.






Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Almacenamiento de resina y fibras	Se recomienda mantener la resina y la fibra a temperatura ambiente	 
2	Preparación de molde y fibra	Limpieza y aplicación de cera desmoldante  Corte de tejido a dimensiones del molde	 

Continúa Tabla 2.43:

3	Preparación de mezcla para matriz	<p>Mezcla de poliéster, octoato de cobalto y MEKP</p> <p>Depende del espesor de lámina a realizar</p>	
4	Fabricación de láminas de compuesto	<p>Distribución uniforme de matriz y refuerzo dentro del molde</p> <p>Aplicación de presión al molde</p> <p>Desmoldeo del tablero</p>	  
5	Inspección del acabado	<p>Observación: No deben existir agrietamientos o porosidad excesiva en el compuesto</p>	



Continúa Tabla 2.43:

6	Curado del material	Aplicación de temperatura de 40°C durante 16 horas para alcanzar propiedades mecánicas finales.	
8	Corte y taladrado de láminas	Elaboración de agujeros para botellas y separadores de madera	
9	Armado del prototipo	Montaje de cada uno de los elementos que conforman el producto final	
10	Inspección del prototipo	Observación y aprobación del producto terminado	
11	Almacenamiento del producto	Conservar el prototipo en las mejores condiciones	

Para complementar el proceso de fabricación se debe considerar las dimensiones del prototipo a ser realizado, en este caso el mostrador de vinos, que se muestran a continuación en la Figura 2.40. Cabe mencionar que los planos se encuentran en el ANEXO 5 donde pueden ser analizados.

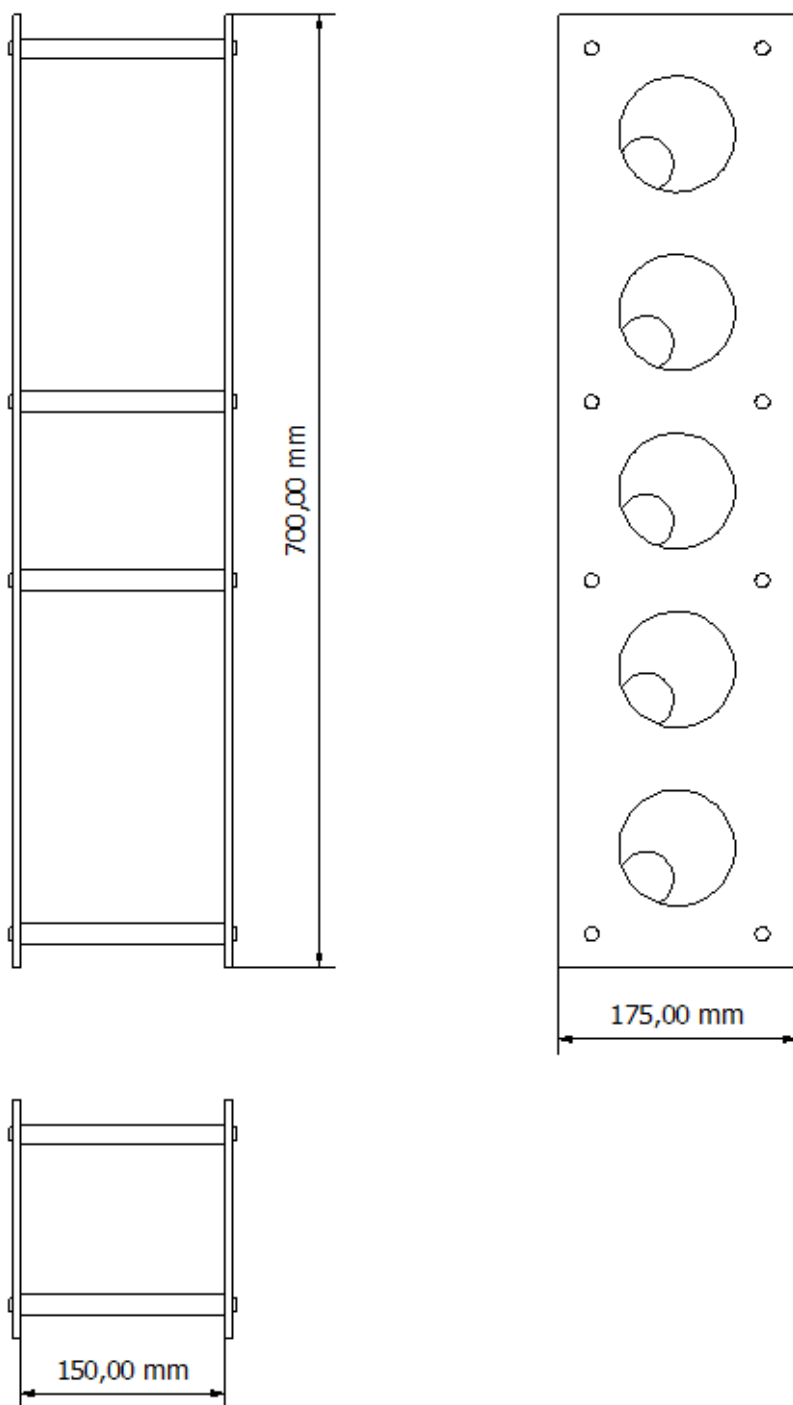


Figura 2.40. Dimensiones del prototipo.

## 2.7. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

### (i) Estimación de costos

En los ensayos preliminares del prototipo del apartado 2.6.7 se elaboraron tableros con espesores de 3, 5 y 7 mm. Con un mayor espesor se utiliza mayor cantidad de matriz y refuerzo, y debido a que el tejido tiene un precio elevado en el mercado de 8,50 dólares el metro, resulta conveniente trabajar con menores espesores. Por esta razón, se decide realizar la estimación de costos de dos mostradores elaborados con tableros de 3 y 5 mm y analizar la diferencia de precios finales de producción. De esta manera, se consigue identificar si la reducción de costos de materia prima al elaborar un prototipo más delgado compensa la disminución de robustez y estabilidad del producto. Dentro de la estimación de costos se tomaron en cuenta los valores de fabricación del molde, materia prima, mano de obra directa y servicios básicos, considerando la producción unitaria ya que se trata de un producto artesanal. En el caso de la mano de obra, se analiza el costo de pagar un operador que elabore los tableros, mecanice todos los elementos y arme el prototipo. Además, se da un resumen de los costos de servicios básicos utilizados en términos de energía para el curado del material. Finalmente, se suman estos valores presentados en las tablas y se obtiene el costo de fabricar un mostrador de vinos.

Tabla 2.44. Costo de fabricación del molde.

<b>Molde</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Costo unitario</b>
Molde para fabricación de tableros	\$ 40,00

Como se puede observar en la tabla anterior, el costo del molde es de cuarenta dólares pero se debe considerar que se pueden fabricar un total de 240 mostradores de vinos. Por lo tanto, el valor del molde por prototipo es de \$ 0,17.

Tabla 2.45. Costo de materia prima en tablero de 3 mm de espesor.

Material	Costo unitario	Cantidad utilizada	Costo
Tejido	8,50 (\$/m)	1 m	\$ 8,50
Poliéster	3,34 (\$/l)	1,8 l	\$ 6,01
Octoato de cobalto	25,00 (\$/l)	0,009 l	\$ 0,23
MEKP	8,30 (\$/l)	0,018 l	\$ 0,15
Caucho	0,80 (\$/m)	3,5 m	\$ 2,80
Separadores de madera	1,00 (\$/u)	8 u	\$ 8,00
Tapas para tarugos	0,20 (\$/u)	16 u	\$ 3,20
		Costo total	\$ 28,89

Tabla 2.46. Costo de materia prima en tablero de 5 mm de espesor.

Material	Costo unitario	Cantidad utilizada	Costo
Tejido	8,50 (\$/m)	1,5 m	\$ 12,75
Poliéster	3,34 (\$/l)	2,8 l	\$ 9,35
Octoato de cobalto	25,00 (\$/l)	0,014 l	\$ 0,35
MEKP	8,30 (\$/l)	0,028 l	\$ 0,23
Caucho	0,80 (\$/m)	3,5 m	\$ 2,80
Separadores de madera	1,00 (\$/u)	8 u	\$ 8,00
Tapas para tarugos	0,25 (\$/u)	16 u	\$ 3,20
		Costo total	\$ 36,68

Al elaborar un prototipo con un espesor de 5mm, se consigue una estructura más rígida capaz de ofrecer una mayor estabilidad y seguridad, lo cual es indispensable a los ojos del cliente, pero el costo en materia prima se incrementa de \$ 28,89 a \$ 36,68 en un 27%.

Tabla 2.47. Costo de servicios básicos utilizados.

Servicio	Cantidad por prototipo	Costo unitario	Costo
Energía Eléctrica*	kWh	[USD]/kWh	[USD]
	88	0,079	6,95

\*Dentro del rubro de servicios básicos se toma en cuenta la energía utilizada para el curado del material con temperatura de 40°C durante un periodo de 16 horas.

Para el cálculo de la mano de obra se toma en cuenta el tiempo de todas las actividades del proceso de producción del prototipo como son: preparación del molde y fibra, preparación de mezcla para matriz, fabricación de tableros de

compuesto, inspección del acabado, curado del material, elaboración de separadores de madera, corte y taladrado de tableros, armado e inspección del prototipo. Para obtener el tiempo total, se realizó un diagrama de red de fabricación del prototipo que se puede observar a continuación en la Figura 2.41.

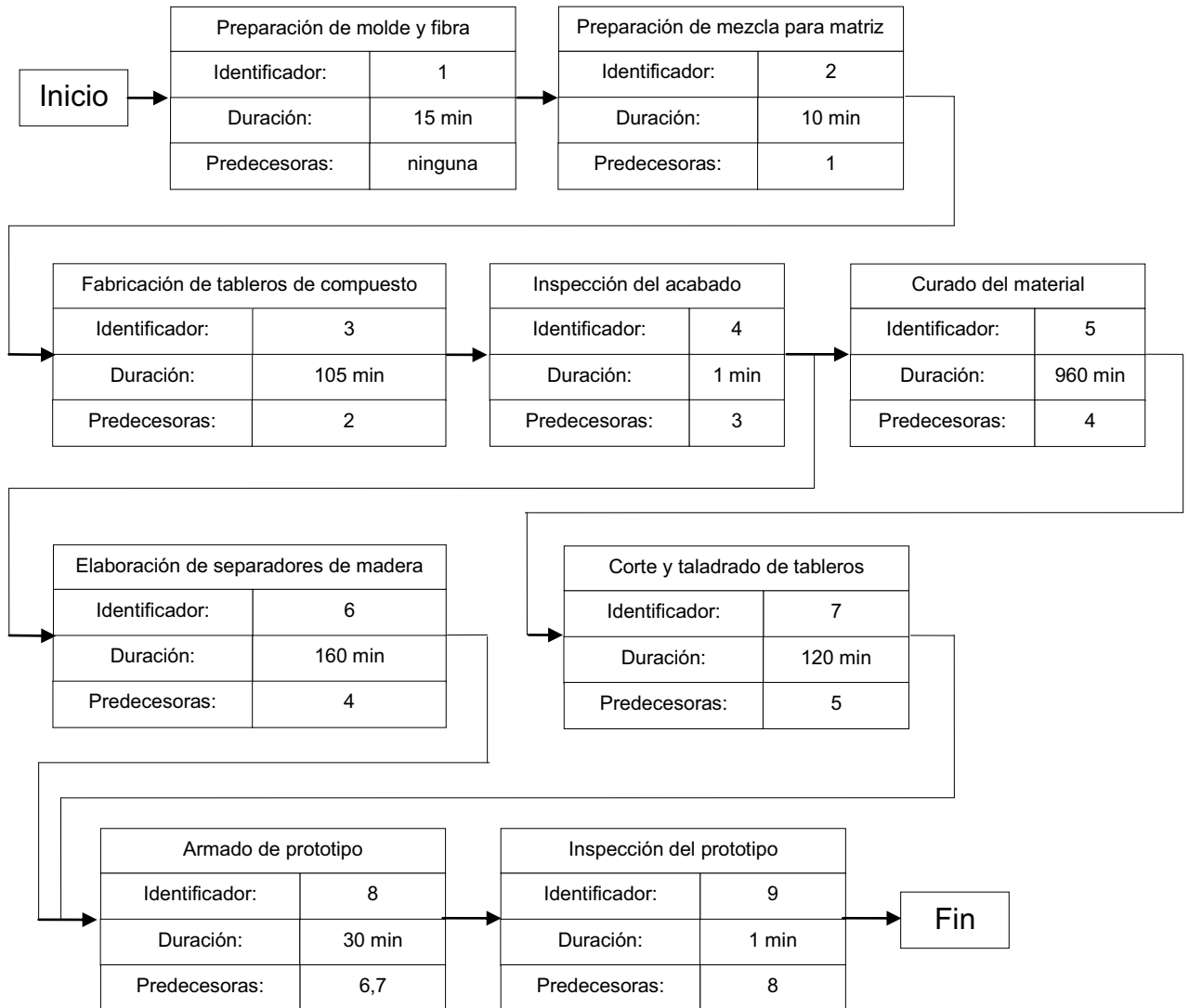


Figura 2.41. Diagrama de red del proceso de producción del prototipo.

Observando el diagrama de red se puede apreciar la secuencia de actividades con un número identificador y los tiempos de duración para conocer el tiempo total de producción. Sumando los tiempos con base a actividades predecesoras se tiene un tiempo total de producción de 1242 minutos, equivalente a 20 horas con 42 minutos. Pero, la actividad 5 (Curado del material) no necesita de supervisión o

trabajo del operador. Debido a este motivo, se sumaron los tiempos hasta la actividad 6 (Elaboración de separadores de madera) descartando la actividad 5 (Curado del material). Como resultado, se obtiene un tiempo de 291 minutos equivalente a 4 horas y 51 minutos. Con este tiempo quedan pendiente 13 horas con 20 minutos de curado del material donde no se necesita de un operador por lo que el trabajador puede volver al día siguiente. En el nuevo día, restan por realizar las últimas tres actividades; 7 (Corte y taladrado de tableros), 8 (Armado del prototipo) y 9 (Inspección del prototipo) que suman un tiempo de 151 minutos equivalente a 2 horas con 31 minutos. Si se suma el tiempo trabajado en el primer día y el tiempo trabajado en el segundo día, se tiene como resultado un tiempo de 7 horas con 22 minutos donde el operador se encontraría realmente trabajando. Si se realiza un pago por horas, se requieren de 8 horas de trabajo. En la Tabla 2.48 se puede apreciar el costo de mano de obra.

Tabla 2.48. Costo de mano de obra.

Mano de obra	Honorarios	Cantidad	Costo
	(\$/h)	(h)	(\$)
Operador	\$ 2,00	8	\$ 16,00

Una vez que se han determinado todos los rubros en la Tabla 2.49 se presenta el resumen de valores para obtener el costo total de producción de un prototipo de espesor de 3 mm y otro con espesor de 5 mm.

Tabla 2.49. Costo de fabricación de cada prototipo.

Prototipo	Molde (\$)	Materia prima (\$)	Servicios básicos (\$)	Mano de obra (\$)	Costo total (\$)
3 mm de espesor	0,17	28,89	6,95	16	52,01
5 mm de espesor	0,17	36,68	6,95	16	59,80

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 2.49, el prototipo elaborado con un espesor de 5 mm muestra un mayor costo de fabricación que el de 3mm. Esto se debe a que elaborar un producto de mayor espesor, se requiere de mayor cantidad de matriz y refuerzo. El rubro de materia prima se incrementa pero a su vez, se ofrece un producto de mayor resistencia. El costo final de fabricación es de \$ 52,01 para el prototipo de 3 mm de espesor y \$ 59,80 para el

de 5 mm. De esta manera, se puede apreciar que la diferencia de costos es de apenas \$ 7,79 por lo que no se justifica la carencia de estabilidad al elaborar un producto más delgado. En conclusión, el producto debe ser elaborado con un tablero de espesor de 5 mm.

Debido a que no se han encontrado locales de venta del presente producto, no se puede comparar valores finales de venta al público. Por tal motivo, se preguntó costos de fabricación del mismo diseño pero en madera en diferentes carpinterías de la ciudad. El valor promedio fue de \$ 90,00 al producto terminado. De esta manera, comparado con este valor promedio se consigue una reducción de costo del 34% para el mostrador de 5 mm de espesor.

## **(ii) Producto final**

La creencia de que los vinos envejecen con los años es completamente cierta. Lo que se debe tomar en cuenta es que los vinos envejecen y se afinan en barricas o en botellas que se encuentran en botellas. Un vino guardado en casa lejos de envejecer es muy probable que, en poco tiempo, comience a perder sus cualidades organolépticas y se degrade hasta convertirse en un líquido amarronado y opaco muy parecido al vinagre. Lo que más se puede hacer es conservar el vino, de manera que se encuentre en perfecto estado a la hora de servirlo en la mesa. Para cumplir con esta condición se deben tomar en cuenta ciertas condiciones:

- (i) **Temperatura baja:** La temperatura recomendada para conservar los vinos en perfectas condiciones oscila entre los 12 y 15°C, buscando la mayor cercanía posible a 12°C y evitando grandes fluctuaciones de temperatura.
- (ii) **Humedad:** La humedad del lugar destinado a la conservación de los vinos no deberá sobrepasar el 70% ni encontrarse por debajo de 60%. Sería recomendable la utilización de un artefacto adosado a la pared o al mostrador para vigilar tanto la humedad relativa como la temperatura.
- (iii) **Posición horizontal de las botellas de vino:** El vino debe mojar el corcho para impedir su oxidación que dará lugar a un sabor malo, acorchado perceptible con tan solo abrir la botella. La horizontalidad no tiene que ser

total y se hace necesario un ángulo de inclinación para la buena conservación del vino.

El mostrador de vinos desarrollado en el presente estudio tiene una capacidad para 5 botellas de vino, pero con la posibilidad de apilarse para el almacenamiento de un mayor número de botellas. Los agujeros para la base y el pico de las botellas están dispuestos de tal manera que ofrecen un ángulo de inclinación de  $8,5^\circ$  para asegurar la buena conservación del vino, ya que el contacto con el corcho resulta indispensable para impedir la oxidación del mismo, al mismo tiempo que ofrece mayor seguridad de las botellas dentro del mostrador. Esta inclinación está presente en cualquiera de las dos posiciones de funcionamiento que ofrece el prototipo, las cuales son: horizontal y vertical. Las aristas están recubiertas de caucho con el objetivo de cumplir tres funciones que son: (i) proteger los bordes del mostrador frente a impactos que puedan causar raspones o pequeñas pérdidas de material que comprometan la utilidad del producto; (ii) mejorar la estética del producto y (iii) aumentar la fricción del prototipo con la superficie de contacto, para de esta manera estabilizar mejor el elemento y evitar movimiento relativos. El mostrador de vinos se puede observar en la Figura 2.42.







Figura 2.42. Mostrador de vinos (producto final).

En cuanto al vino, es importante anotar la fecha de adquisición para no apurar los tiempos de conservación en el hogar. En cualquier caso, por muy buena cuna que tenga el vino, el tiempo de conservación nunca rebasará los 20 años. Solo se pueden conservar los vinos que permiten hacerlo. Sería impensable que un vino de mesa aguantara más allá de unos meses, y si lo hace sería porque cuenta con alcoholes añadidos artificialmente. Para la conservación se debe contar con vinos de más del 12,5% de vol. de alcohol que hayan sido destinados, como mínimo, a crianza. Una mejor conservación tienen los vinos de reserva y mejor aún las grandes reservas [24].

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Con el fin de obtener un material con la mejor combinación de propiedades para realizar ensayos de impacto y fabricar un prototipo capaz de remplazar un producto existente en el mercado, se realizó un análisis y discusión de todos los resultados obtenidos experimentalmente, los cuales son mostrados en el presente capítulo. Se exponen y analizan resultados de los ensayos realizados a tracción y flexión que son los que permiten determinar la mejor configuración de refuerzo y mejor combinación de propiedades. Seguidamente, se muestran los resultados de impacto obtenidos mediante caída de dardo realizando una comparación con probetas de resina poliéster. Posteriormente, se ofrece la discusión de todos los resultados encontrados enfatizando los puntos de selección y determinación del mejor material y se los compara frente otros materiales compuestos. Finalmente, se discute el proceso de fabricación del compuesto en cuanto a probetas y prototipo, enfatizando las ventajas y desventajas.

#### **3.1. DISCUSIÓN DE ENSAYOS PRELIMINARES Y CARACTERIZACIÓN DE HILOS Y TEJIDO DE CABUYA**

Los ensayos preliminares fueron realizados con dos objetivos principales: (i) determinar la factibilidad de producción de probetas para ensayos de tracción, flexión e impacto con un determinado refuerzo de fibra de cabuya y (ii) para obtener los valores de mayor fracción volumétrica que es posible añadir en los compuestos. El refuerzo natural se encuentra presente en el mercado local como hilo o tejido. Dentro de los hilos, se encuentran el fino y el grueso, caracterizados de acuerdo al diámetro promedio; dentro de los tejidos se tienen el fino, el normal y el grueso, caracterizados conforme al número de hilos en las direcciones longitudinal y transversal en un tramo determinado.

El hilo grueso posee un diámetro de 1,5 mm, demasiado grueso para ser procesado dentro de los moldes de flexión, por lo cual se descartó la posibilidad de utilizar este refuerzo. El hilo fino por otro lado, al tener un diámetro menor que el anterior de 0,9 mm, permitió de manera satisfactoria la elaboración de las probetas normalizadas. En la Figura 3.1 se puede apreciar el tamaño de los hilos.



Figura 3.1. Fibra de cabuya: (a) hilo fino (0,9 mm); (b) hilo grueso (1,5 mm).

En cuanto a la resistencia a la tracción, el hilo soportó una carga de 87 N que si se divide para el área del hilo de cabuya se tiene un esfuerzo máximo a la tracción de 136 MPa. Esto se realiza para obtener un valor comparable al bibliográfico de la fibra de cabuya de 305 MPa. Se observa que el hilo tiene una menor resistencia que la fibra sola. Esta reducción puede deberse al proceso de hilado, ya que la fibra es maltratada durante la extracción, lavado, secado y torsión en el hilado. Todo esto debilita la fibra que sumado a las dificultades durante el ensayo en cuanto a sujeción del hilo, hacen que se obtenga un valor reducido. Con respecto a la densidad, en este caso fue de  $0,83 \text{ g/cm}^3$ , muy inferior al bibliográfico de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . Este resultado podría explicarse con el hecho que el hilo está conformado por la unión a torsión de un gran número de fibras, proceso en el cual cierta cantidad de aire queda atrapado entre fibras provocando disminución en la densidad del hilo y finalmente del compuesto formado. De esta

manera, las dos fracciones volumétricas utilizadas en esta configuración fueron 0,23 y 0,39.

El tejido grueso posee 1,87 hilos en la dirección longitudinal y 2,50 hilos en la dirección transversal por cada centímetro de longitud. Por ende, los hilos del tejido están dispuestos con una excesiva separación, tornado imposible su utilización dentro de los moldes esencialmente en los de flexión cuyo ancho es de apenas 13 mm. Por otro lado, el tejido fino presenta un arreglo de hilos demasiado estrecho con 4,60 hilos en la dirección longitudinal y 5,13 hilos en la dirección transversal por centímetro de longitud. Debido a esto, existen serios problemas con la elaboración de probetas, ya que la resina poliéster no puede fluir correctamente entre los espaciamiento de la trama y urdimbre resultando en una pobre mojabilidad de la fibra y consiguiente interfaz fibra-matriz. El tejido normal en cambio, muestra un arreglo de hilos estrecho pero no demasiado para impedir el flujo de resina, por lo que se alcanza una correcta mojabilidad de las fibras. Presenta 4,80 hilos en la dirección longitudinal y 4,53 hilos en la dirección transversal por centímetro de longitud. En la Figura 3.2 se pueden apreciar el arreglo de hilos en la trama y urdimbre de los diferentes tejidos planos.

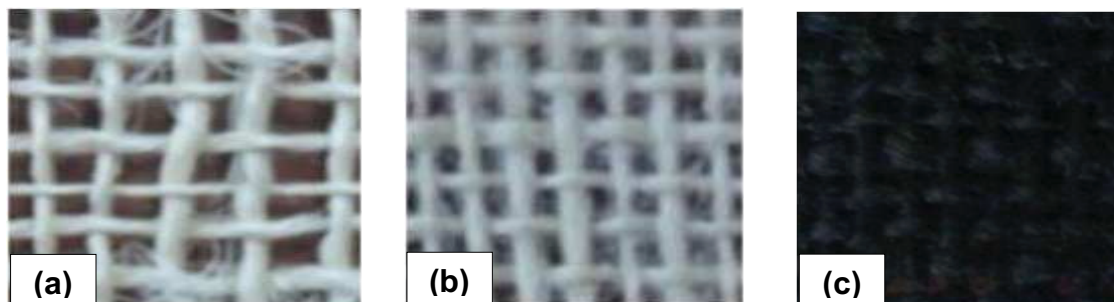


Figura 3.2. Fibra de cabuya: (a) tejido grueso (1,87 x 2,50 hilos/cm); (b) tejido normal (4,80 x 4,53 hilos/cm); (c) tejido fino (4,60 x 5,13 hilos/cm).

En cuanto a la resistencia a la tracción del tejido se tiene que soporta una carga de 314,7 N con una elongación de 2,9% en la dirección longitudinal y una carga de 277,2 N con una elongación de 6,8% en la dirección trasversal. Con respecto a la densidad, en este caso fue de  $1,29 \text{ g/cm}^3$  similar al bibliográfico de  $1,3 \text{ g/cm}^3$  y diferente al del hilo de cabuya. Esto puede explicarse debido a que en la

realización del tejido, el hilo es engomado para tener una mayor uniformidad que facilita el proceso de hilado. De esta manera, los espaciamentos entre las fibras son ocupados por la goma incrementando la densidad del hilo y por ende del compuesto. Para este caso del tejido las fracciones volumétricas utilizadas fueron de 0,28 y 0,34 para ensayos de tracción, 0,26 y 0,30 para ensayos de flexión y 0,26 para ensayos de impacto. Estas fueron las mayores fracciones volumétricas alcanzadas.

### **3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS REALIZADOS DE TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO**

Luego de haber realizado todos los ensayos de tracción, flexión e impacto, los resultados deben ser expuestos para ser discutidos. En el presente apartado se muestran todos los resultados obtenidos y analizados por separado dependiendo del ensayo. Así se exhiben ensayos de tracción, flexión e impacto. La discusión de los resultados se realiza conjuntamente con el análisis luego de cada tabla y gráfico.

#### **3.2.1. ENSAYO DE TRACCIÓN**

Los ensayos de tracción se realizaron a todas las configuraciones descritas en el acápite 2.4.2.1 más el poliéster. Dichas pruebas se realizaron en la máquina universal de ensayos. Los resultados obtenidos fueron de gran interés, los cuales se resumen en la Tabla 3.1 donde se muestran detalladamente las propiedades más importantes.

Tabla 3.1. Resultados de ensayos a tracción.

Designación	Tracción										$\delta = v_f * \delta_f + v_m * \delta_m$				
	Fracción Volumétrica	Fracción Volumétrica Real	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$S\sigma$ [MPa]	$CV\sigma$ [%]	E [MPa]	SE [MPa]	CVE [%]	$\delta_{real}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$\delta_{teórica}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$\epsilon$	Se	CVE	Observaciones	
L.E.15d	0,23	0,22	55,66	1,73	3,1	2540,52	84,57	3,3	1,10	1,12	0,024024	0,001661	6,91	Si	
L.E.15d	0,39	0,35	74,32	4,14	5,6	4025,60	386,65	9,6	1,06	1,07	0,020488	0,002755	13,45	Si	
T45°.E.15d	0,28	0,27	49,38	1,66	3,4	2978,72	221,89	7,4	1,24	1,23	0,018520	0,001730	9,34	Si	
T45°.E.15d	0,34	0,34	50,78	0,94	1,8	3396,62	336,84	9,9	1,23	1,23	0,017244	0,002439	14,14	Si	
T0°.E.15d	0,28	0,28	56,14	2,38	4,2	4080,78	378,37	9,3	1,24	1,23	0,013374	0,001022	7,65	Si	
T0°.E.15d	0,34	0,34	62,00	2,03	3,3	5305,30	374,02	7,1	1,24	1,23	0,011953	0,001002	8,39	Si	
Resina	0,00	0,00	28,67	0,69	2,4	1492,42	96,18	6,4	1,19	1,20	0,023504	0,002592	11,03	Si	
A.E.15d	0,34	0,35	56,61	3,03	5,3	4962,94	488,38	9,8	1,23	1,24	0,011465	0,000567	4,95	Si	
A.E.16h	0,34	0,34	54,72	3,35	6,1	6373,98	477,86	7,5	1,23	1,23	0,009354	0,000661	7,07	Si	
A.E.24h	0,34	0,34	54,03	1,96	3,6	6348,08	457,77	7,2	1,24	1,23	0,009205	0,000583	6,33	Si	
T0°.15d	0,34	0,33	67,69	2,40	3,5	5421,66	462,68	8,5	1,25	1,23	0,012622	0,001261	9,99	Si	
A.15d	0,34	0,33	59,63	2,46	4,1	5430,64	544,60	10,0	1,23	1,23	0,011024	0,001029	9,33	Si	
A.16h	0,34	0,35	60,63	3,03	5,0	6508,18	263,23	4,0	1,23	1,23	0,009953	0,000714	7,17	Si	

En la tabla anterior se muestra de forma resumida y detallada los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción. Se pueden observar las propiedades más relevantes como los valores de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, deformación y densidad de todas las configuraciones desarrolladas para ensayos de tracción. Cabe mencionar que la designación de las probetas se establece en el apartado 2.4.2.1.

En principio se realizaron las seis primeras configuraciones de la Tabla 3.1 para compararlas con la resina poliéster. Así, se buscó obtener el comportamiento de la fibra de cabuya como elemento de refuerzo, ya sea longitudinalmente como hilo o en tejido orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto al eje de las probetas, todas con dos fracciones volumétricas. En la Figura 3.3 se indican las curvas esfuerzo vs. deformación para una probeta de resina poliéster y para las seis primeras configuraciones de refuerzo en hilo y tejido. Esta gráfica permite apreciar a breves rasgos el comportamiento mecánico de estos materiales al variar la configuración del refuerzo y fracción volumétrica.

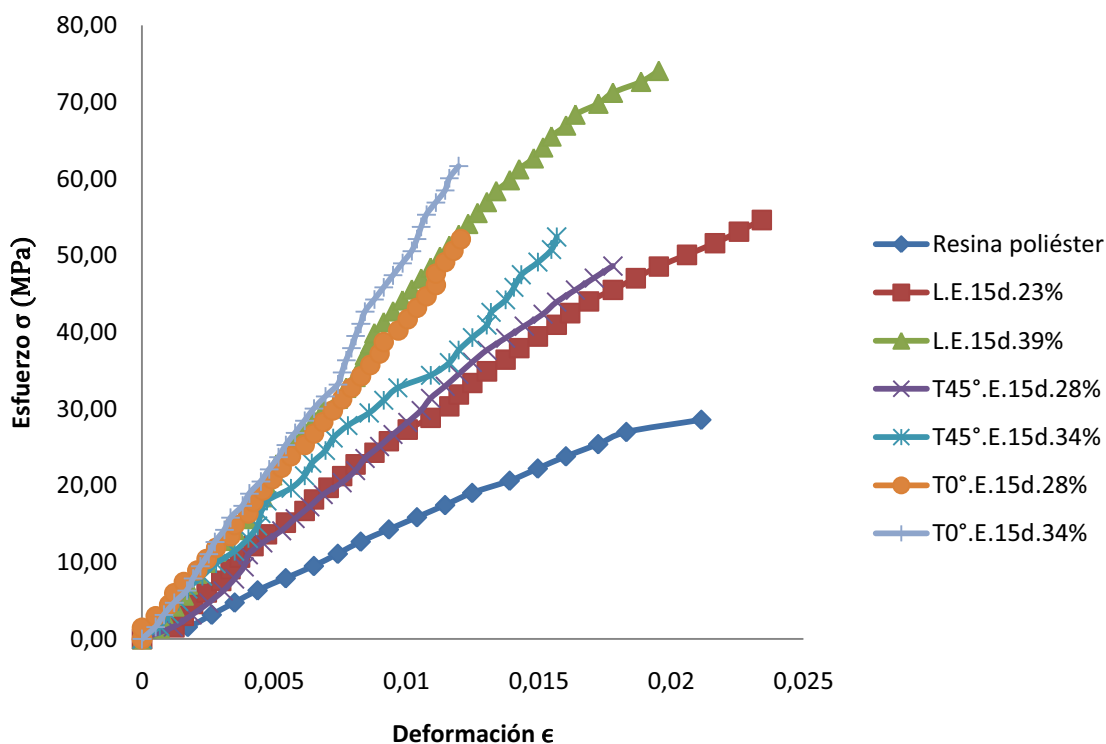


Figura 3.3. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las primeras seis configuraciones realizadas de la Tabla 3.1 y de resina poliéster.

En la figura anterior se puede apreciar que existe un aumento en el esfuerzo máximo a tracción en todas las configuraciones compuestas. En cuanto al módulo elástico, existió un incremento considerable respecto al módulo de la matriz de resina poliéster para todos los compuestos, siendo los de mayor fracción volumétrica los que muestran un mayor aumento, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.4. Es importante indicar que los materiales compuestos elaborados con tejido mostraron incrementos mayores en el módulo de elasticidad que los materiales compuestos fabricados con fibra continua longitudinal. Estos resultados se complementan con los de elongación a la ruptura, puesto que en este caso el aumento en la rigidez del material se tradujo en la disminución de su capacidad de elongarse.

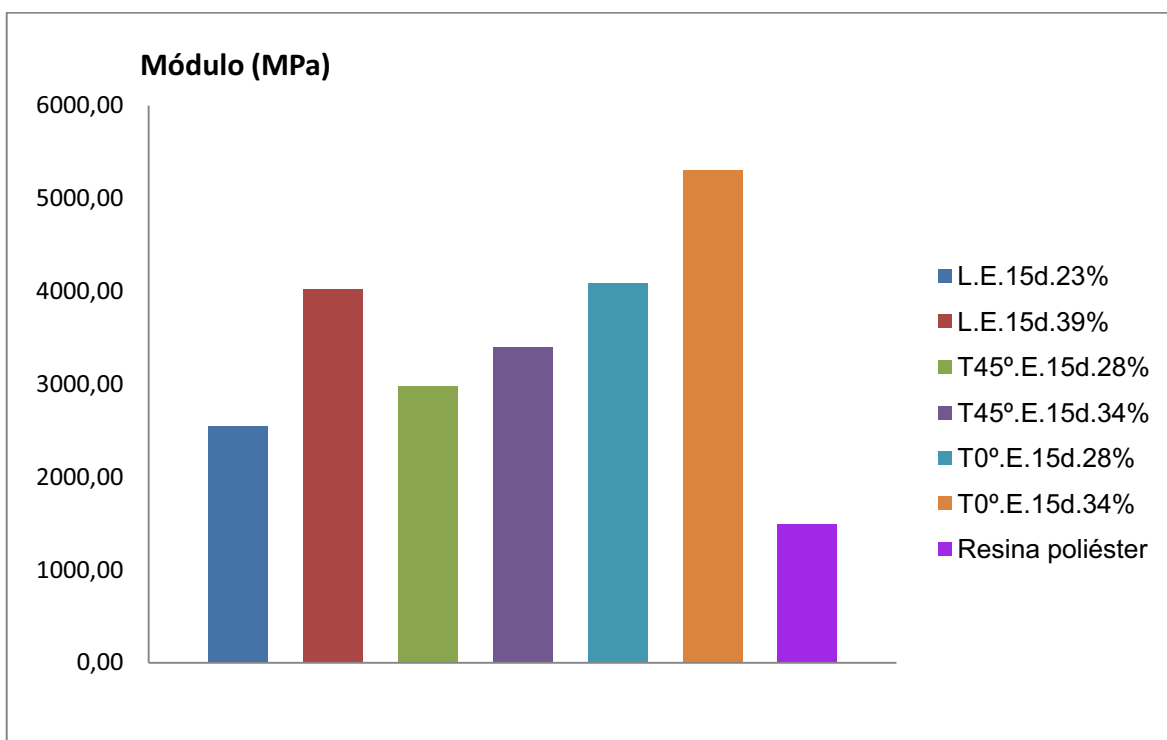


Figura 3.4. Módulo de elasticidad a tracción de las primeras seis configuraciones realizadas de la Tabla 3.1 y de la resina poliéster.

Para analizar de mejor manera el incremento de esfuerzo máximo a tracción y módulo de elasticidad se elaboró la Tabla 3.2 donde se observan los valores de esfuerzo máximo, módulo elástico y sus respectivos incrementos con respecto a la resina poliéster.



Tabla 3.2. Incremento en esfuerzo máximo y módulo de elasticidad a tracción de diferentes materiales compuestos con respecto a la resina poliéster.

Tipo de Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Incremento	E (MPa)	Incremento
L.E.15d.23%	55,66	94,2%	2540,52	70,2%
L.E.15d.39%	74,32	159,3%	4025,60	169,7%
T45°.E.15d.28%	49,38	72,3%	2978,72	99,6%
T45°.E.15d.34%	50,78	77,1%	3396,62	127,6%
T0°.E.15d.28%	56,14	95,8%	4080,78	173,4%
T0°.E.15d.34%	62,00	116,3%	5305,30	255,5%
Resina	28,67	0,0%	1492,42	0,0%

En todas las probetas se consiguió aumentar el esfuerzo máximo a tracción y la rigidez al introducir fibra de cabuya como elemento de refuerzo, siendo la configuración L.E.15d.39% la que presenta la mayor resistencia a la tracción con un valor de 74,32 MPa, lo cual representa un incremento del 159,3% con respecto a la resina poliéster. En cambio la probeta T0°.E.15d.34% ofrece la mayor rigidez con valor de 5305,3 MPa, consiguiendo un aumento del 255,5% respecto al poliéster. Esto podría explicarse debido a que al existir la adecuada cantidad de refuerzo, las fibras absorberían parte de la carga, minimizando el efecto que la fuerza aplicada tendría en la matriz.

Con respecto al refuerzo longitudinal, ofrece la mayor resistencia a la tracción pero solamente en el sentido en que se ordenan las fibras, a diferencia del tejido que ofrece la misma resistencia en dos direcciones. El tejido orientado a 0° ofrece valores elevados cercanos a los del longitudinal. Con una orientación de 45° se observan valores más bajos pero se logra obtener un incremento considerable en las propiedades con respecto a la resina. Para comparar las distintas propiedades se decidió realizar un gráfico de tres ejes con las mejores configuraciones. Este gráfico se puede observar en la Figura 3.5, donde se comparan las propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía. Esta última se refiere al número de direcciones en las que el material puede soportar la misma carga; es decir, que a mayor número de direcciones, mayor semejanza a la isotropía.

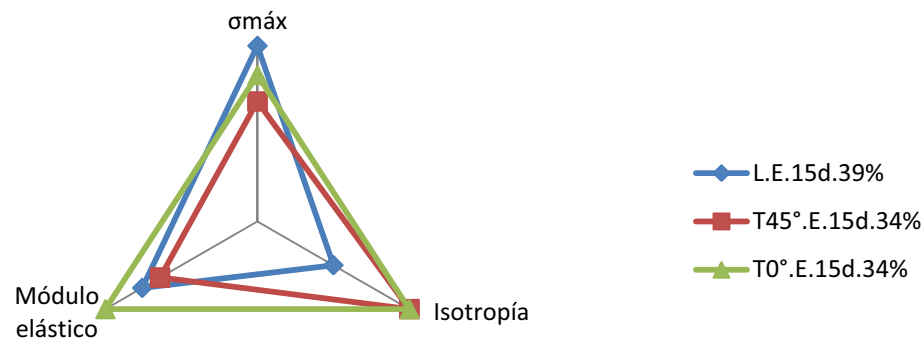


Figura 3.5. Esfuerzo máximo a tracción, módulo elástico e isotropía de L.E.15d.39%, T45°.E.15d.34% y T0°.E.15d.34%.

En el gráfico de la Figura 3.5 se puede apreciar tres diferentes configuraciones que son: L.E.15d.39%, T45°.E.15d.34%, T0°.E.15d.34%. Estas tres configuraciones permiten analizar el comportamiento de las diferentes formas de refuerzo utilizado, con hilo orientado longitudinalmente y tejido en sus dos orientaciones de 0° y 45°. Analizando las tres propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía, se observa que la configuración que ofrece la mejor combinación de propiedades es T0°.E.15d.34% ya que ocupa un mayor área dentro del gráfico, seguido de T45°.E.15d.34% y finalmente L.E.15d.39%. Este análisis indica que el tejido es mejor alternativa de refuerzo que el hilo; por esta razón se decide seguir investigando al tejido como refuerzo del compuesto cabuya-poliéster.

En busca de obtener un material con mayor similitud a lo isotrópico, se dispone trabajar con tejido en capas alternadas. Es decir, una capa orientada a 0° y la siguiente a 45° hasta completar el número de capas precisado para la fracción volumétrica determinada, que en este caso resulta ser 0,34 ya que ofrece mejores propiedades que la fracción volumétrica de 0,28. Simultáneamente, se buscó analizar el efecto de variar el curado del material, elaborando diferentes probetas con curado a temperatura ambiente durante 15 días, curado a 40°C por 16 horas y curado a 40°C por 24 horas. En la Figura 3.6 se pueden observar las curvas

esfuerzo vs. deformación de la nueva configuración alternada junto con las orientadas a  $0^\circ$  y a  $45^\circ$  con el fin de comparar el comportamiento.

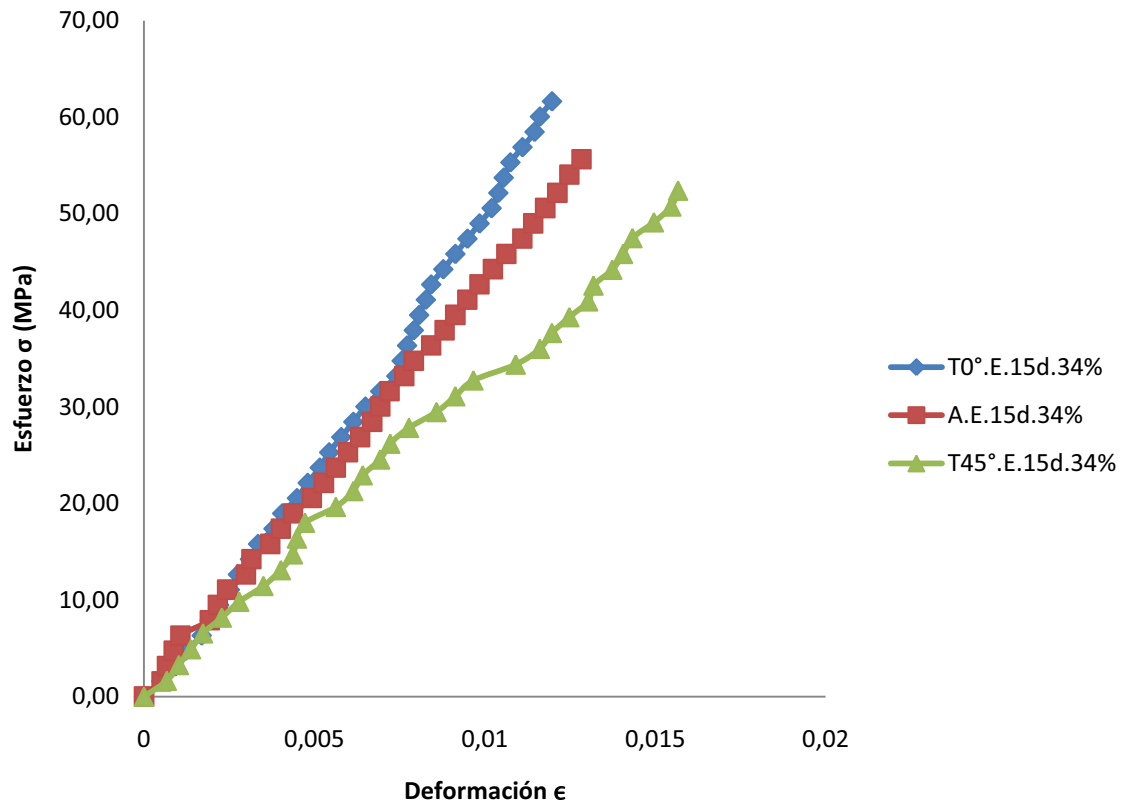


Figura 3.6. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones T0°.E.15d.34%, A.E.15d.34%, T45°.E.15d.34%.

Se puede apreciar que el material alternado tiene propiedades intermedias entre sus configuraciones base de orientación a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  como era de esperarse, ya que este material resulta ser completamente simétrico al tener dos capas de tejido orientado a  $45^\circ$  y 3 capas de tejido a  $0^\circ$ . El esfuerzo máximo a tracción es de 56,51 MPa, con lo cual se tiene un incremento en 11,5% con respecto al tejido orientado a  $45^\circ$  y una disminución de 8,7% con respecto al tejido orientado a  $0^\circ$ . En cuanto al módulo elástico se tiene un incremento del 46,1% con respecto al tejido orientado a  $45^\circ$  y una disminución del 6,5% con respecto al tejido orientado a  $0^\circ$ . Este nuevo material alternado presenta propiedades cercanas a su orientación más fuerte y su comportamiento se asemeja al isotrópico soportando cargas similares en cualquier dirección que se aplique la fuerza, lo cual resulta beneficioso en la selección para la fabricación de un prototipo. Para comparar las

distintas propiedades se decidió realizar un gráfico de tres ejes donde se comparan las propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía.

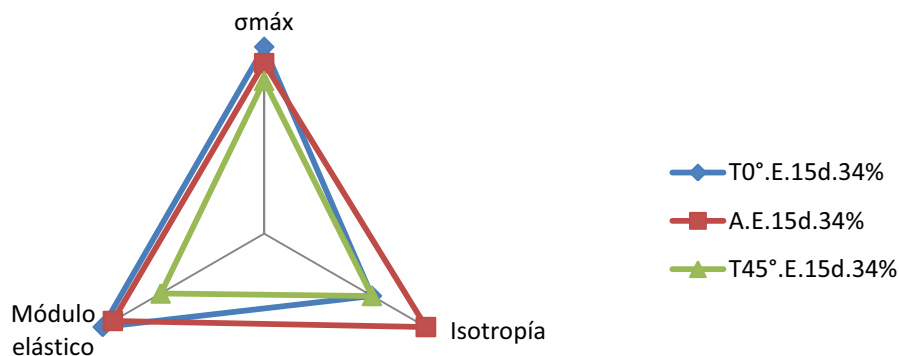


Figura 3.7. Esfuerzo máximo a tracción, módulo elástico e isotropía de las configuraciones T0°.E.15d.34%, A.E.15d.34% y T45°.E.15d.34%.

En el gráfico anterior se pueden apreciar tres diferentes configuraciones que son: T0°.E.15d.34%, T45°.E.15d.34%, A.E.15d.34%. Estas tres configuraciones permiten analizar el comportamiento del tejido alternado con respecto a sus orientaciones base de 0° y 45°. Analizando las tres propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía, se observa que la configuración que ofrece la mejor combinación de propiedades es A.E.15d.34% ya que ocupa un mayor área dentro del gráfico. Este análisis indica que el tejido alternado es la mejor alternativa de refuerzo ya que ofrece la mayor isotropía entre los compuestos con excelentes propiedades de esfuerzo máximo y rigidez.

Para que el nuevo material poliéster-cabuya desarrolle enteramente sus propiedades, el proceso de curado debe llevarse a cabo por completo, lo cual requiere un tiempo mínimo de 15 días, pero existe la posibilidad de reducirlo mediante el uso de una estufa. Por este motivo se plantea la opción de realizar el curado con temperatura. La temperatura seleccionada es de 40°C ya que es una temperatura que se puede alcanzar con relativa facilidad a nivel artesanal con las condiciones adecuadas e inclusive hasta se podría aprovechar la energía solar. En la Figura 3.8 se pueden observar las curvas esfuerzo vs. deformación de los tres diferentes curados realizados.

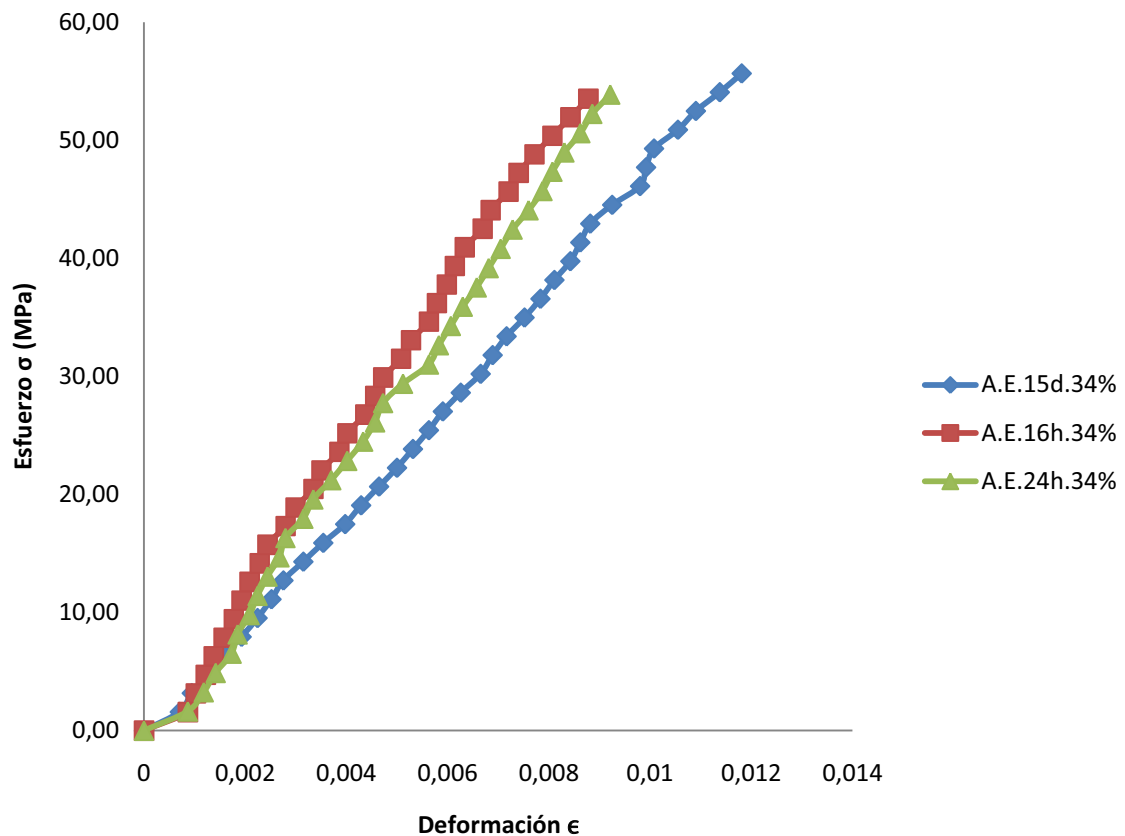


Figura 3.8. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de compuestos con tejido alternado con diferentes esquemas de curado.

Si se analiza en la figura anterior las curvas de las probetas con curado a temperatura se puede apreciar que existe una similitud entre ellas. Para la configuración A.E.16h.34% se tiene un esfuerzo máximo de 54,72 MPa, que es un valor muy parecido al de la configuración A.E.24h.34% que es de 54,03 MPa. De igual manera, los valores de módulo elástico son prácticamente equivalentes con 6373,98 MPa para A.E.16h.34% y 6348,08 MPa para A.E.24h.34%.

Como resultado del análisis se tiene que el material responde de igual manera a un curado durante 16 horas o 24 horas si se lo realiza a una temperatura de 40°C, ya que no existen diferencias estadísticamente significativas. Por ende se debe trabajar con el primero debido a que se utiliza menos recursos en energía y tiempo para obtener las mismas propiedades. Ahora, si se compara con respecto a la probeta de curado de 15 días se tiene que se puede alcanzar un valor similar de esfuerzo máximo a la tracción e incrementar la rigidez del material en más del

25%. Con este proceso se puede reemplazar de manera satisfactoria el curado de 15 días y reducirlo a tan solo unas cuantas horas.

Todas las probetas realizadas hasta el momento contienen estireno como elemento constitutivo de la matriz de poliéster, pero existe la posibilidad de prescindir del mismo y observar cómo se ven afectadas las propiedades. Para este propósito se elaboraron probetas de las configuraciones T0°.15d.34% y A.15d.34%. En las Figuras 3.9 y 3.10 se presentan los gráficos de esfuerzo vs. deformación obtenidos de las configuraciones realizadas sin estireno conjuntamente con las configuraciones respectivas de los compuestos elaborados con estireno.

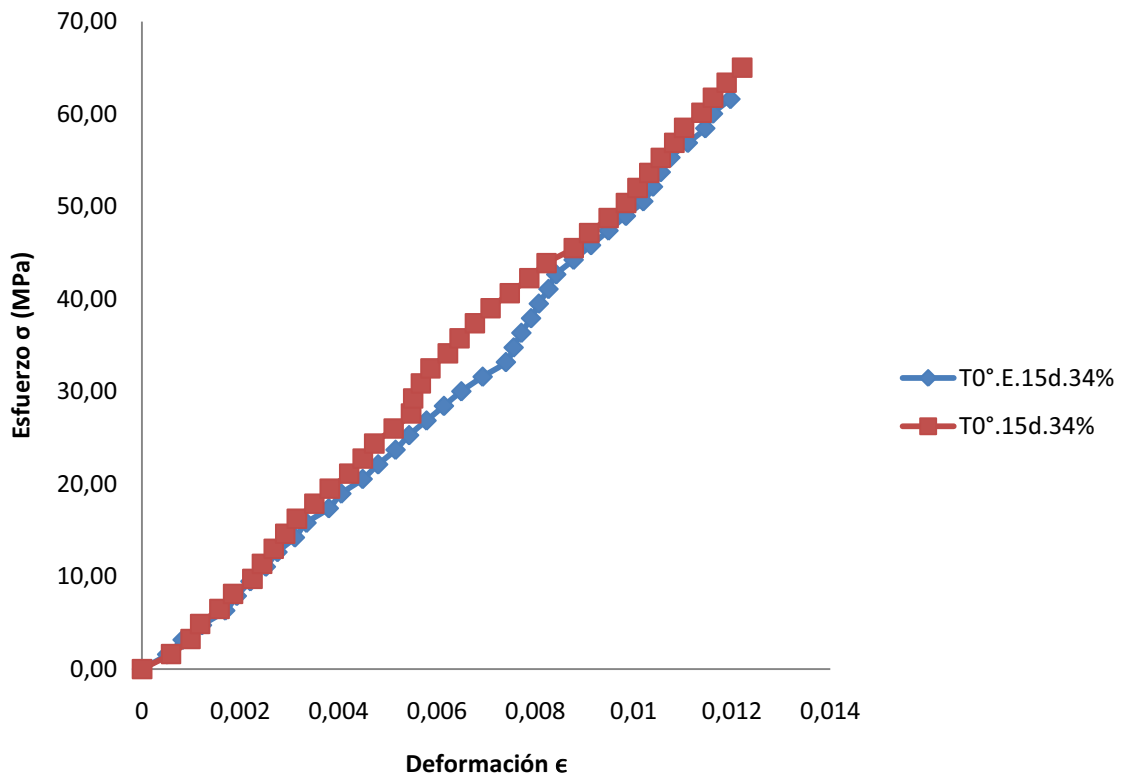


Figura 3.9. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones T0°.E.15d.34% y T0°.15d.34%.

En la Figura 3.9 se observan las gráficas de esfuerzo vs. deformación de dos configuraciones elaboradas con refuerzo tejido orientado a 0°. La diferencia radica en la adición de estireno a la matriz. La configuración T0°.15d.34% alcanza un

valor de esfuerzo máximo a la tracción de 67,69 MPa, presentando un incremento del 9,17% con respecto a la configuración T0°.E.15d.34% que es la configuración con estireno en la matriz. El valor del módulo de elasticidad de la configuración T0°.15d.34% es de 5421,66 MPa, con lo cual se obtiene un aumento del 2,19% con respecto a la configuración T0°.E.15d.34%. El resultado obtenido sugiere que es beneficioso prescindir del estireno como elemento constitutivo de la matriz, ya que las propiedades de esfuerzo máximo a la tracción y rigidez se ven incrementadas.

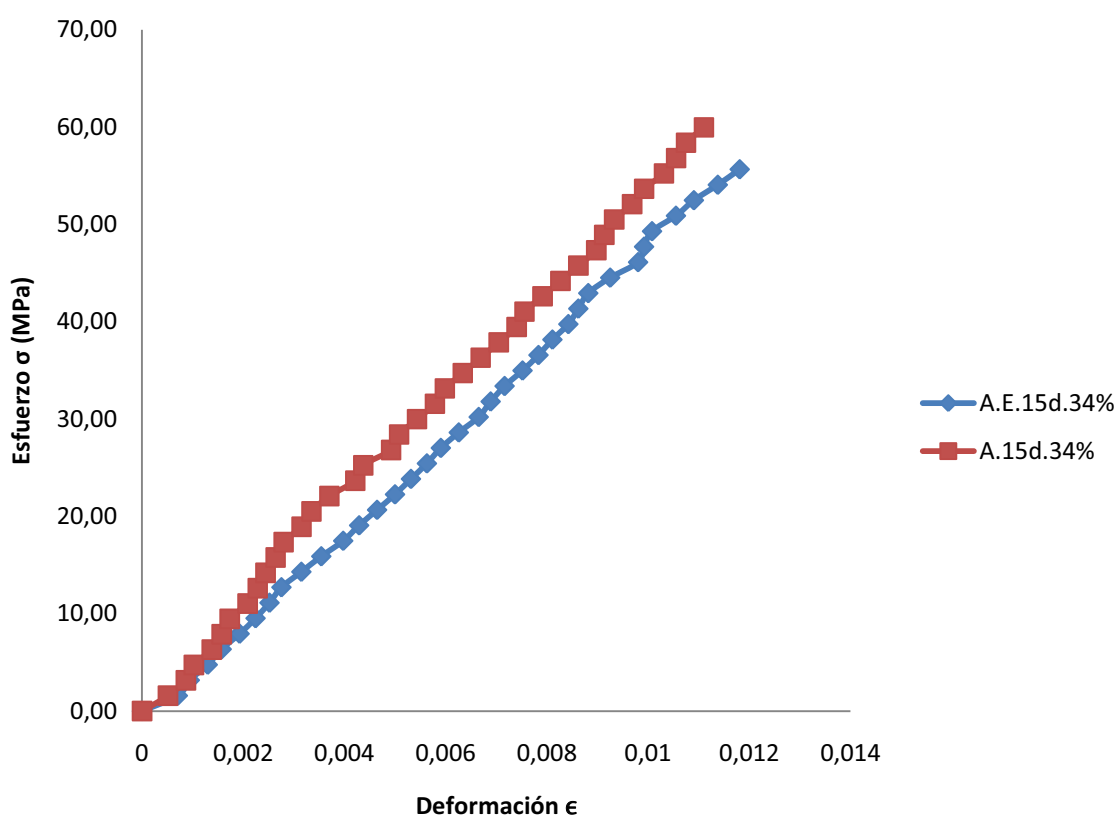


Figura 3.10. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones A.E.15d.34% y A.15d.34%.

En la Figura 3.10 se observan las gráficas de esfuerzo vs. deformación de dos configuraciones elaboradas con refuerzo tejido alternado. La diferencia radica en añadir estireno a la matriz. La configuración A.15d.34% alcanza un valor de esfuerzo máximo a la tracción de 59,63 MPa presentando un incremento del 5,32% con respecto a la configuración A.E.15d.34% que es la configuración con

estireno en la matriz. El valor de módulo de elasticidad de la configuración A.15d.34% es de 5430,64MPa, con lo cual se obtiene un aumento del 9,42% con respecto a la configuración A.E.15d.34%. El resultado obtenido sugiere que es beneficioso prescindir del estireno como elemento constitutivo de la matriz, ya que las propiedades de esfuerzo máximo a la tracción y rigidez se ven incrementadas.

La tendencia en ambos casos, con tejido a 0° y tejido alternado, es incrementar el esfuerzo máximo a la tracción y el módulo de elasticidad cuando se trabaja sin estireno. Cabe mencionar que la no utilización de estireno reduce los costos de fabricación del prototipo y simplifica el proceso de elaboración. Por lo tanto resulta beneficioso prescindir de este elemento como parte de la matriz poliéster.

Resumiendo los resultados obtenidos se tiene que el tejido brinda mejores resultados que el hilo, ya que se consiguen propiedades elevadas en dos direcciones de acción de la carga a diferencia del refuerzo longitudinal que solamente ofrece mejoría en una dirección. Al trabajar con refuerzo alternado las propiedades resultantes son intermedias entre las orientaciones base de 0° y 45°, pero más cercanas a la primera que presenta valores más elevados. Lo interesante de la configuración alternada es que se asemeja a un material isotrópico que es capaz de soportar el mismo esfuerzo en cualquier dirección.

Con respecto a los diferentes curados, utilizando temperatura durante el proceso se consigue incrementar el módulo elástico del material con una disminución mínima en el esfuerzo máximo a la tracción. Con esto se puede reducir el tiempo de curado de días a tan solo horas y mejorar la rigidez del compuesto. Finalmente, considerando al estireno, se obtienen mejores resultados con incrementos en el esfuerzo máximo a la tracción y módulo elástico al prescindir de este elemento. Por consiguiente, se decide elaborar una probeta que cumpla con todos estos requerimientos con el fin de obtener el material con la mejor combinación de propiedades a tracción.

El nuevo material a realizarse es el A.16h.34% (alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40°C y fracción volumétrica de 0,34). Este compuesto cumple todos los requisitos ya que utiliza refuerzo alternado que se asemeja a un material



isotrópico. No contiene estireno en la matriz por lo que las propiedades se incrementan, se simplifica el proceso de elaboración y se reducen costos. El curado es con temperatura de 40°C que puede ser alcanzada artesanalmente, con lo cual se incrementa la rigidez y se disminuye el tiempo de producción de 15 días a únicamente 16 horas. Finalmente, la fracción volumétrica de refuerzo es de 0,34 con lo que se tiene un mayor porcentaje de degradabilidad en el material al final de la vida útil. En la Figura 3.11 se indican las curvas esfuerzo vs. deformación para las configuraciones A.16h.34% y resina poliéster.

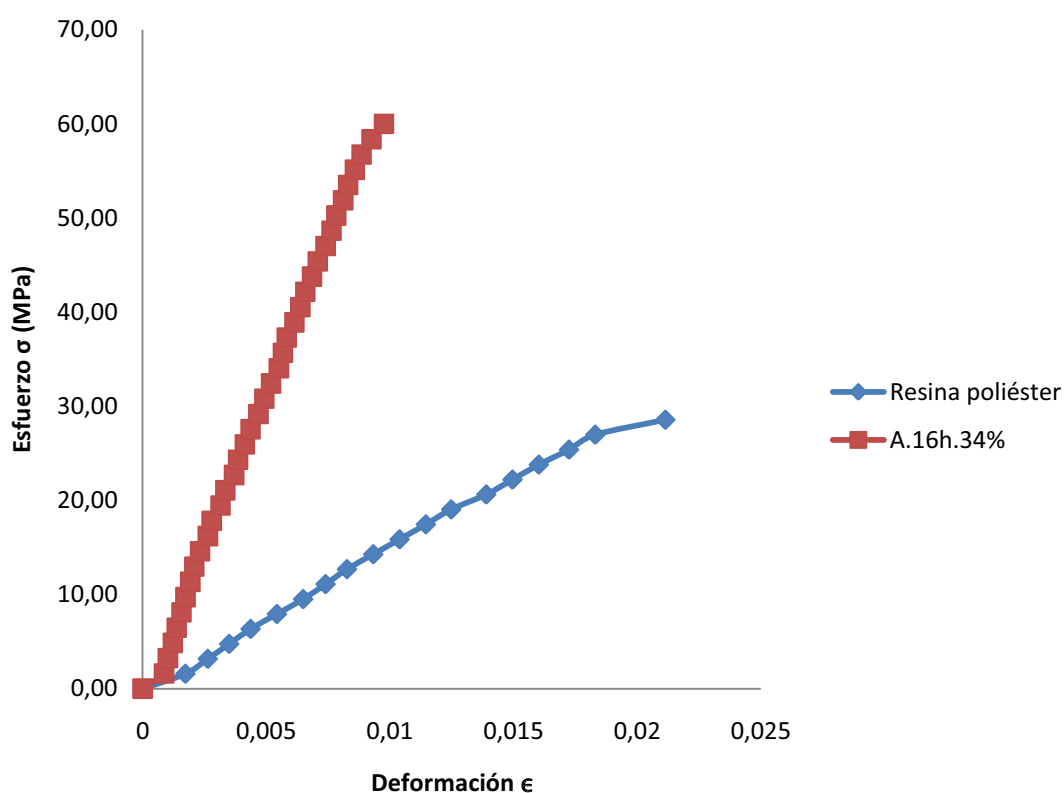


Figura 3.11. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las configuraciones A.16h.34% y resina poliéster.

En la Figura 3.11 se observa la gráfica de esfuerzo vs. deformación de la configuración A.16h.34% comparada frente a la resina poliéster. El esfuerzo máximo a la tracción para el nuevo material es de 60,63 MPa y del poliéster es de 28,67 MPa, obteniéndose un incremento del 111,51%. El valor de módulo de elasticidad de la configuración A.16h.34% es de 6508,18 MPa y de la resina es de

1492,42 MPa, consiguiendo un aumento del 336,08%. Los módulos de elasticidad de ambos materiales se pueden observar en la Figura 3.12.

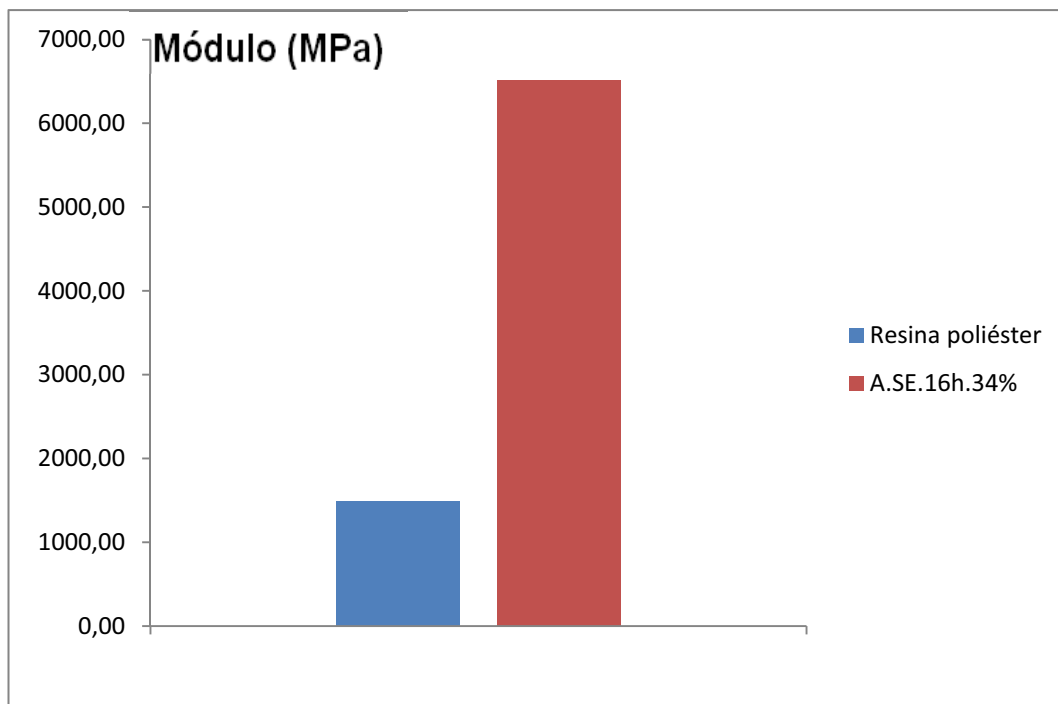


Figura 3.12. Módulo de elasticidad de A.16h.34% y resina poliéster.

Es importante mencionar que los valores de desviación estándar (S) y coeficiente de variación (CV) para el esfuerzo máximo a tracción, módulo de elasticidad y deformación se pueden observar en la Tabla 3.1. Conjuntamente en la tabla se pueden apreciar los valores de densidad de los compuestos teniendo valores entre 1,06 y 1,10 g/cm<sup>3</sup> para el refuerzo continuo longitudinal de hilo de cabuya, y valores entre 1,23 y 1,25 g/cm<sup>3</sup> para el refuerzo tejido.

A continuación, en la Figura 3.13 se presentan las fracturas que se presentaron en las probetas ensayadas enfocándonos en el refuerzo utilizado, ya que las configuraciones con el mismo refuerzo de hilo o tejido presentan la misma fractura independientemente de la fracción volumétrica, uso de estireno y curado. Así se tiene la fractura en la resina poliéster, en materiales reforzados con hilo de cabuya, con tejido orientado a 0°, con tejido orientado a 45° y con tejido alternado.



(a) Fractura frágil de la matriz sin producirse una reducción de la sección de la probeta.



(b) Fractura enteramente de la matriz. Las fibras se fracturan parcialmente.



(c) Tanto la matriz como las fibras se fracturan.



(d) Tanto la matriz como las fibras se fracturan.



(e) Tanto la matriz como las fibras se fracturan.

Figura 3.13. Fracturas observadas en: (a) resina poliéster; (b) hilo de cabuya; (c) tejido orientado a 45°; (d) tejido orientado a 0°; (e) tejido alternado.

### 3.2.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Los ensayos de flexión se realizaron a todas las configuraciones descritas en el acápite 2.4.2.2 en la máquina universal de ensayos. Los resultados obtenidos fueron muy interesantes y se resumen en la Tabla 3.3 donde se muestran detalladamente las propiedades más importantes.

Tabla 3.3. Resultados de ensayos a flexión.

Designación	Fracción Volumétrica		Flexión										$\delta = v_f \cdot \delta f + v_m \cdot \delta m$			
	Fracción Volumétrica	Fracción Volumétrica Real	$\sigma_{f\text{máx}}$ [MPa]	$S_{\sigma f}$ [MPa]	$CV_{\sigma f}$ [%]	EF [MPa]	$S_{EF}$ [MPa]	$CV_{EF}$ [%]	$\delta_{real}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$\delta_{teórica}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_f$	$S_{\epsilon f}$	$CV_{\epsilon f}$	Observaciones		
L.CE.15d	0,23	0,22	51,39	2,00	3,9	2355,58	166,63	7,1	1,12	1,12	0,043653	0,001159	2,655	No		
L.CE.15d	0,39	0,36	61,78	1,74	2,8	2953,48	206,26	7,0	1,08	1,07	0,045998	0,000612	1,33	No		
T45°.CE.15d	0,26	0,24	52,71	2,02	3,8	2349,60	196,49	8,4	1,25	1,22	0,043661	0,000212	0,48	No		
T45°.CE.15d	0,30	0,28	69,41	2,80	4,0	3133,28	296,99	9,5	1,24	1,23	0,033415	0,003792	11,35	Si		
T0°.CE.15d	0,26	0,25	52,62	2,17	4,1	2845,68	134,59	4,7	1,24	1,22	0,043288	0,001119	2,58	No		
T0°.CE.15d	0,30	0,28	65,99	1,49	2,3	3703,62	80,44	2,2	1,22	1,23	0,024942	0,001413	5,67	Si		
Resina	0,00	0,00	56,62	2,86	5,1	1867,82	122,55	6,6	1,18	1,20	0,042889	0,001494	3,48	Si		
A.CE.15d	0,30	0,28	72,50	4,21	5,8	3736,40	135,99	3,6	1,22	1,23	0,027754	0,001129	4,07	Si		
A.CE.16h	0,30	0,28	69,02	3,36	4,9	4284,80	179,84	4,2	1,23	1,23	0,021627	0,001456	6,73	Si		
A.CE.24h	0,30	0,28	70,97	1,93	2,7	4350,92	157,97	3,6	1,24	1,23	0,019693	0,001805	9,17	Si		
T0°.SE.15d	0,30	0,28	69,75	2,62	3,8	4064,84	238,14	5,9	1,25	1,23	0,026144	0,002895	11,07	Si		
A.SE.15d	0,30	0,28	74,16	4,08	5,5	4144,66	115,43	2,8	1,23	1,23	0,022866	0,002366	10,35	Si		
A.SE.16h	0,30	0,28	76,29	1,43	1,9	4434,10	130,83	3,0	1,24	1,23	0,019937	0,001597	8,01	Si		

En la tabla anterior se muestra de forma resumida y detallada los resultados obtenidos mediante el ensayo de flexión. Se pueden observar las propiedades más relevantes como los valores de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, deformación y densidad de todas las configuraciones desarrolladas para ensayos de flexión. Cabe mencionar que la designación de las probetas se establece en el apartado 2.4.2.2.

En principio se realizaron las seis primeras configuraciones de la Tabla 3.3 para compararlas con la resina poliéster. Así, se buscó obtener el comportamiento de la fibra de cabuya como elemento de refuerzo ya sea longitudinalmente como hilo o en tejido orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto al eje de las probetas, todas con dos fracciones volumétricas. En la Figura 3.14 se indican las curvas esfuerzo vs. deformación para una probeta de resina poliéster y para las seis primeras configuraciones de refuerzo en hilo y tejido. Esta gráfica permite apreciar a breves rasgos el comportamiento mecánico de estos materiales al variar la configuración del refuerzo y fracción volumétrica.

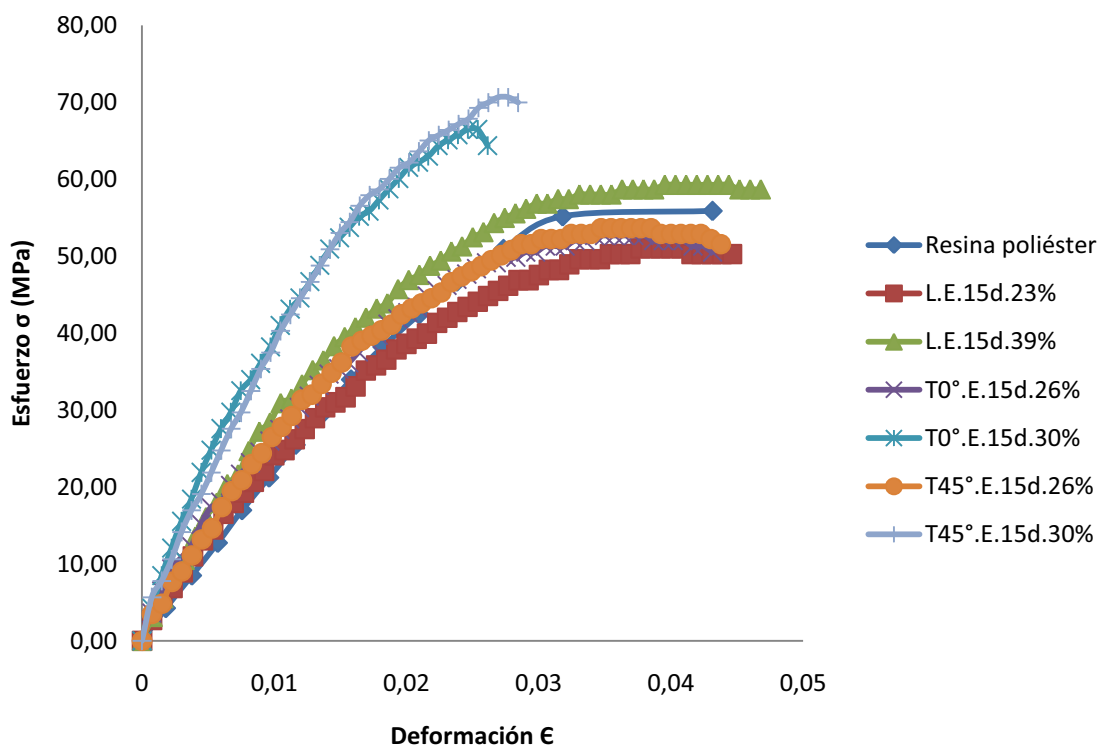


Figura 3.14. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las primeras seis configuraciones realizadas de la Tabla 3.1 y de resina poliéster.

En la figura anterior se puede apreciar que existe un aumento en el esfuerzo máximo a tracción en las configuraciones de mayor fracción volumétrica de refuerzo y una disminución en las de menor fracción volumétrica. En cuanto al módulo elástico existió un incremento considerable respecto al módulo de la matriz de resina poliéster, para todos los compuestos siendo los de mayor fracción volumétrica los que muestran un mayor aumento como se puede apreciar en la Figura 3.15. Es importante indicar que los materiales compuestos elaborados con tejido mostraron incrementos mayores en el módulo de elasticidad que los materiales compuestos fabricados con fibra continua longitudinal. Estos resultados se complementan con los de elongación a la ruptura, puesto que en este caso el aumento en la rigidez del material se tradujo en la disminución de su capacidad de elongarse.

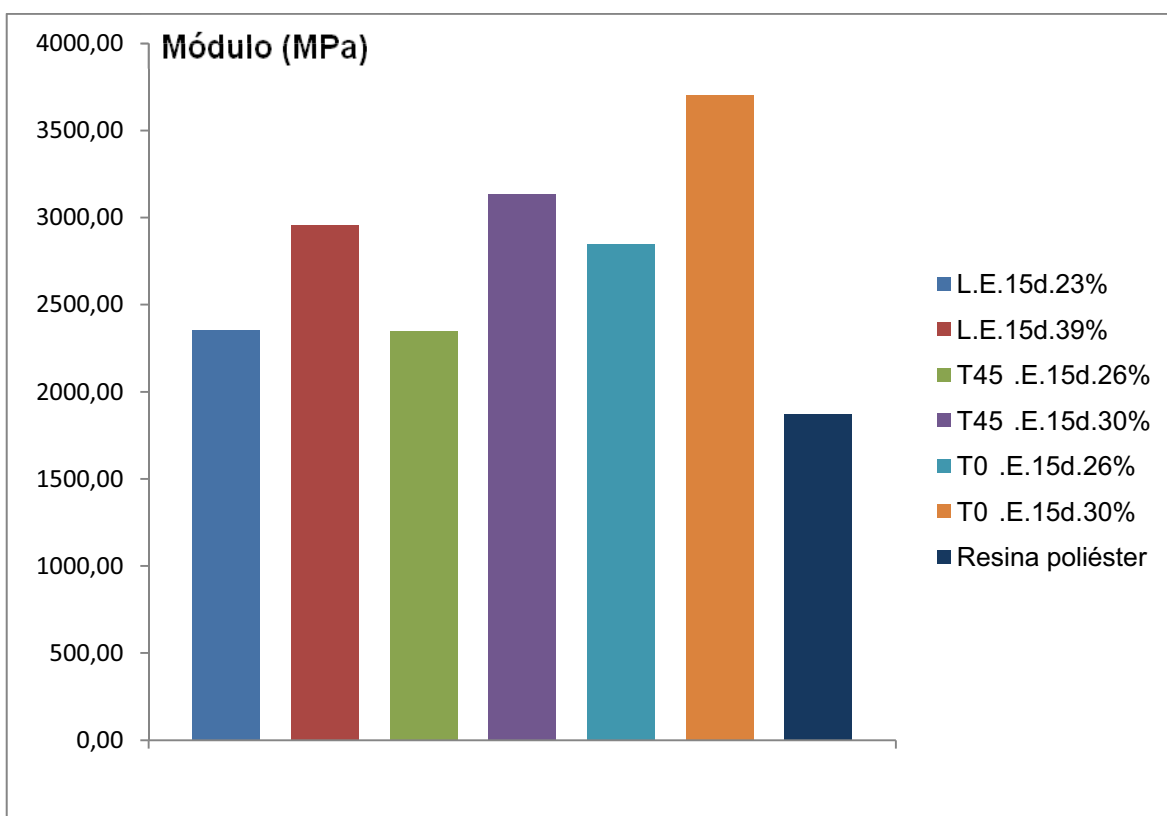


Figura 3.15. Módulo de elasticidad a la flexión de algunos materiales compuestos de cabuya-poliéster.

Para analizar de mejor manera el incremento de esfuerzo máximo a tracción y módulo de elasticidad se elaboró la Tabla 3.4 donde se observan los valores de

esfuerzo máximo, módulo elástico y sus respectivos incrementos con respecto a la resina poliéster.

Tabla 3.4. Incremento en esfuerzo máximo y módulo de elasticidad a flexión de diferentes materiales compuestos con respecto a la resina poliéster.

Tipo de Probeta	$\sigma_{Fm\acute{a}x}$ (MPa)	Incremento	Ef(MPa)	Incremento
L.E.15d.23%	51,39	-9,2%	2355,58	26,1%
L.E.15d.39%	61,78	9,1%	2953,48	58,1%
T45°.E.15d.26%	52,71	-6,9%	2349,60	25,8%
T45°.E.15d.30%	69,41	22,6%	3133,28	67,8%
T0°.E.15d.26%	52,62	-7,1%	2845,68	52,4%
T0°.E.15d.30%	65,99	16,6%	3703,62	98,3%
Resina	56,62	0,0%	1867,82	0,0%

El esfuerzo máximo a la flexión es menor para los materiales compuestos elaborados con la menor entre las dos fracciones volumétricas utilizadas en cada configuración de refuerzo con respecto al de la matriz poliéster, como se puede constatar en la Tabla 3.4. El descenso de esta propiedad mecánica para el refuerzo continuo longitudinal fue del 9,2%, para el tejido a 45° fue del 6,9% y para el tejido a 0° fue del 7,1%. Estos resultados podrían explicarse al considerar los problemas que presentarían estos compuestos en cuanto a la pobre distribución del refuerzo en la matriz al haber una baja cantidad de fibra.

Por otro lado, las probetas elaboradas con mayor cantidad de refuerzo, es decir, mayor fracción volumétrica, presentan un incremento en el esfuerzo máximo a la flexión con relación al de la matriz poliéster. El aumento de esta propiedad mecánica para el refuerzo continuo longitudinal fue del 9,1%, para el tejido a 45° fue del 22,6% y para el tejido a 0° fue del 16,6%. Este incremento se debe a que al existir la adecuada cantidad de refuerzo, las fibras absorben parte de la carga, minimizando el efecto que la fuerza aplicada tendría en la matriz. Adicionalmente, se debe recalcar que el refuerzo que muestra el mejor comportamiento frente a esfuerzos de flexión es el tejido orientado a 45° con un valor de 69,41 MPa.

Analizando el módulo de elasticidad, las probetas con mayor cantidad de refuerzo presentan un mayor incremento en el módulo de elasticidad a la flexión con relación al de la matriz poliéster. El aumento de esta propiedad mecánica para el



refuerzo continuo longitudinal fue del 58,1%, para el tejido a 45° fue del 67,8% y para el tejido a 0° fue del 98,3%. En este caso el material que muestra en la mayor rigidez es el tejido orientado a 0° con un valor de 3703,62 MPa. Para comparar las distintas propiedades se decidió realizar un gráfico de tres ejes con las mejores configuraciones. Este gráfico se puede observar en la Figura 3.16, donde se comparan las propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía. Esta última se refiere al número de direcciones en las que el material puede soportar la misma carga; es decir, que a mayor número de direcciones, mayor semejanza a la isotropía.

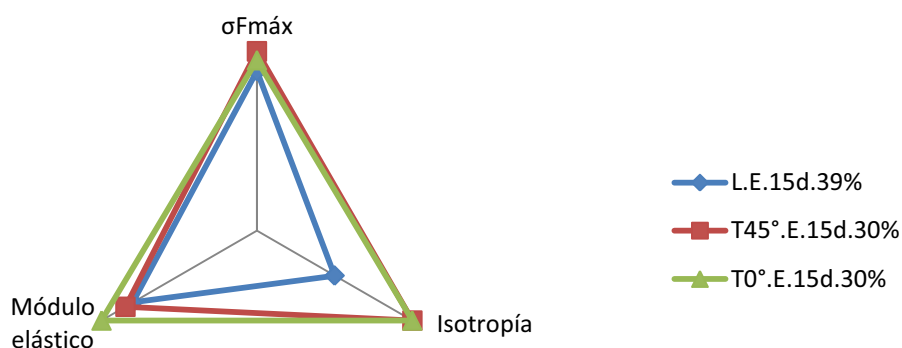


Figura 3.16. Esfuerzo máximo a flexión, módulo elástico e isotropía de L.E.15d.39%, T45°.E.15d.30% y T0°.E.15d.30%.

En el gráfico de la Figura 3.16 se pueden apreciar tres diferentes configuraciones que son: L.E.15d.39%, T45°.E.15d.30%, T0°.E.15d.30%. Estas tres configuraciones permiten analizar el comportamiento de las diferentes formas de refuerzo utilizado, con hilo orientado longitudinalmente y tejido en sus dos orientaciones de 0° y 45°. Analizando las tres propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía, se observa que la configuración que ofrece la mejor combinación de propiedades es T0°.E.15d.30% ya que ocupa un mayor área dentro del gráfico, seguido de T45°.E.15d.30% y finalmente L.E.15d.39%. Este análisis indica que el tejido es mejor alternativa de refuerzo que el hilo, por esta razón se decide seguir investigando al tejido como refuerzo del compuesto cabuya-poliéster.

De la misma manera que en los ensayos a tracción, se busca obtener un material similar al isotrópico por lo que se dispone trabajar con tejido en capas alternadas, es decir, una capa orientada a  $0^\circ$  y la siguiente a  $45^\circ$  hasta completar el número de capas precisado para la fracción volumétrica determinada, que este caso resulta ser 0,30 ya que ofrece mejores propiedades que con fracción volumétrica de 0,26. Simultáneamente se buscó analizar el efecto de variar el curado del material elaborando diferentes probetas con curado a temperatura ambiente durante 15 días, curado a  $40^\circ\text{C}$  por 16 horas y curado a  $40^\circ\text{C}$  por 24 horas. En la Figura 3.17, se pueden observar las curvas esfuerzo vs. deformación de la nueva configuración alternada junto con las orientadas a  $0^\circ$  y a  $45^\circ$  con el fin de comparar el comportamiento.

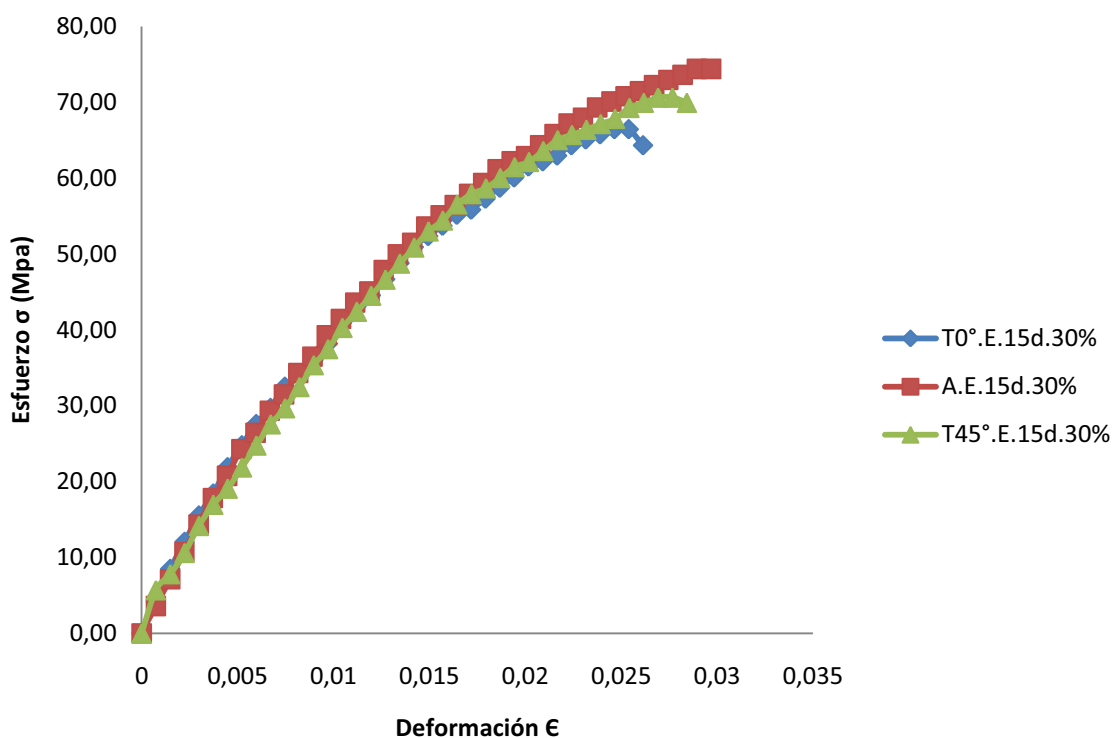


Figura 3.17. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones T0°.E.15d.30%, A.E.15d.30%, T45°.E.15d.30%.

Dado que el número de capas para cumplir con el requerimiento de fracción volumétrica de 0,30 es ocho, la probeta no es completamente simétrica ya que posee cuatro capas de tejido orientadas a  $0^\circ$  y cuatro orientadas a  $45^\circ$ . Por tal motivo, se tiene que los resultados del nuevo material alternado no son

intermedios entre las orientaciones base de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ , sino que inclusive presenta valores más elevados de esfuerzo máximo a la flexión con 72,50 MPa y módulo de elasticidad de 3736,40 MPa. Para comparar las distintas propiedades se decidió realizar un gráfico de tres ejes donde se comparan las propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía.

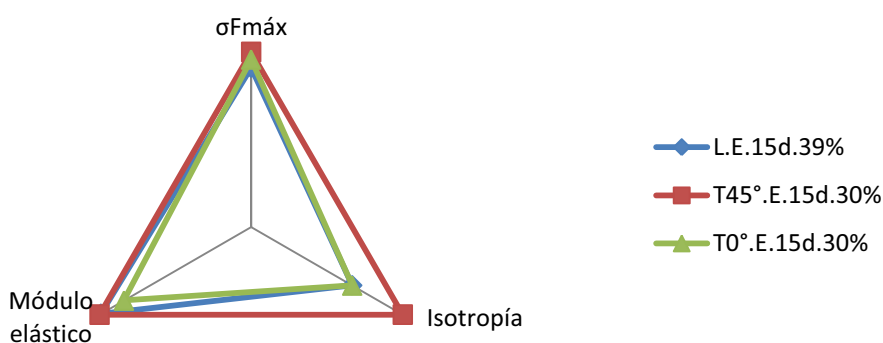


Figura 3.18. Esfuerzo máximo a flexión, módulo elástico e isotropía de las configuraciones  $T0^\circ$ .E.15d.30%, A.E.15d.30% y  $T45^\circ$ .E.15d.30%.

En el gráfico de la Figura 3.18 se pueden apreciar tres diferentes configuraciones que son:  $T0^\circ$ .E.15d.30%,  $T45^\circ$ .E.15d.30% y A.E.15d.30%. Estas tres configuraciones permiten analizar el comportamiento del tejido alternado con respecto a sus orientaciones base de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ . Analizando las tres propiedades de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad e isotropía, se observa que la configuración que ofrece la mejor combinación de propiedades es A.E.15d.34% ya que ocupa un mayor área dentro del gráfico. Este análisis indica que el tejido alternado es la mejor alternativa de refuerzo ya que ofrece la mayor isotropía entre los compuestos con excelentes propiedades de esfuerzo máximo y rigidez.

Para que el nuevo material poliéster-cabuya desarrolle enteramente sus propiedades, el proceso de curado debe llevarse a cabo por completo, lo cual requiere un tiempo mínimo de 15 días, pero existe la posibilidad de reducirlo mediante el uso de una estufa. Por este motivo, se plantea la opción de realizar el curado con temperatura. La temperatura seleccionada es de  $40^\circ\text{C}$ , ya que es una

temperatura que se puede alcanzar con relativa facilidad a nivel artesanal con las condiciones adecuadas e inclusive hasta se podría aprovechar la energía solar. En la Figura 3.19, se pueden observar las curvas esfuerzo vs. deformación de los tres diferentes curados realizados.

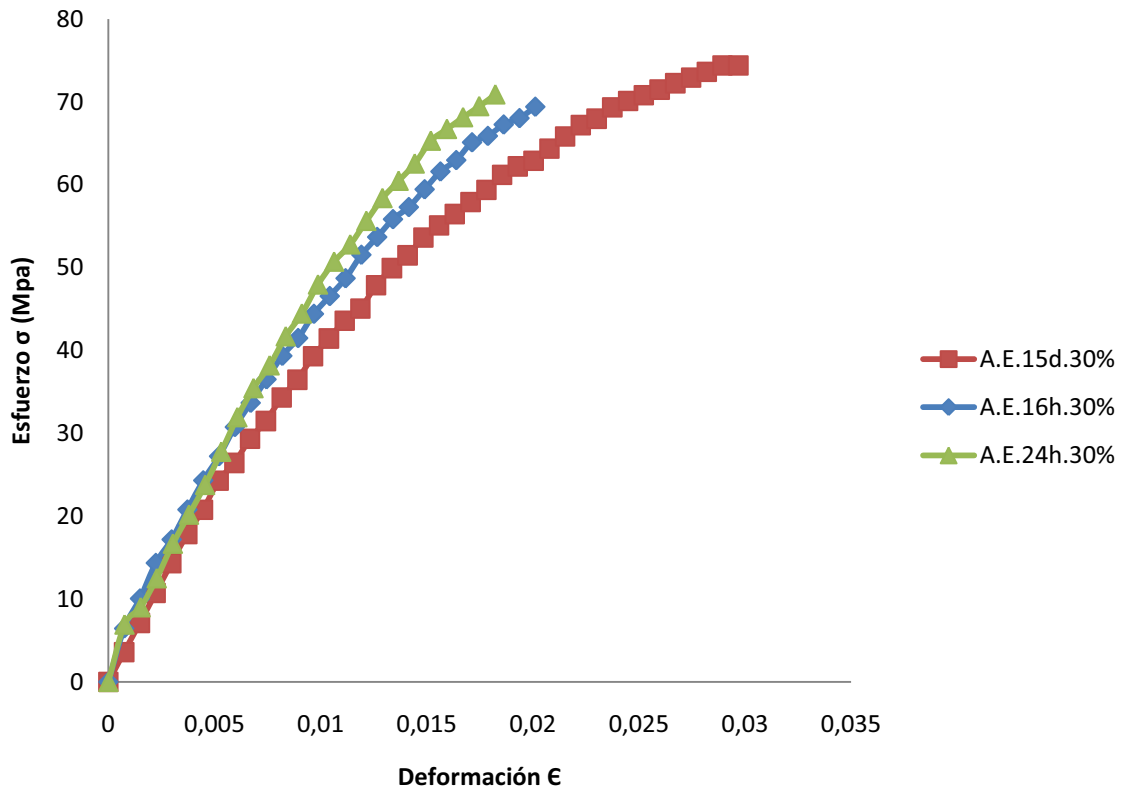


Figura 3.19. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de compuestos con tejido alternado con diferentes procesos de curado.

Si se analiza en la figura anterior, en las curvas de las probetas con curado a temperatura se puede apreciar que existe una similitud entre ellas. Para la configuración A.E.16h.30% se tiene un esfuerzo máximo de 60,02 MPa muy parecido al de la configuración A.E.24h.30% que tiene un valor de 70,97 MPa. De igual manera, los valores de módulo elástico son prácticamente equivalentes con 4284,80 MPa para A.E.16h.30% y 4350,92 MPa para A.E.24h.30%.

Como resultado del análisis se tiene que el material responde de igual manera a un curado durante 16 horas o 24 horas si se lo realiza a una temperatura de 40°C, ya que no existen diferencias estadísticamente significativas. El mismo resultado

se obtuvo en los ensayos de tracción, por ende se debe trabajar con el primero ya que se utiliza menos recursos en energía y tiempo para obtener las mismas propiedades. Si se compara con respecto a la probeta de curado de 15 días se tiene que se puede alcanzar un valor similar de esfuerzo máximo a la tracción e incrementar la rigidez del material en más del 14%. Con este proceso se puede reemplazar de manera satisfactoria el curado de 15 días y reducirlo a tan solo unas cuantas horas.

Todas las probetas realizadas hasta el momento contienen estireno como elemento constitutivo de la matriz de poliéster, pero existe la posibilidad de prescindir del mismo y observar como se ven afectadas las propiedades. Para este propósito se elaboraron probetas de las configuraciones T0°.15d.30% y A.15d.30%. A continuación las Figuras 3.20 y 3.21 se presentan los gráficos de esfuerzo vs deformación obtenidos de las configuraciones realizadas sin estireno, conjuntamente con las configuraciones respectivas de los compuestos elaborados con estireno.

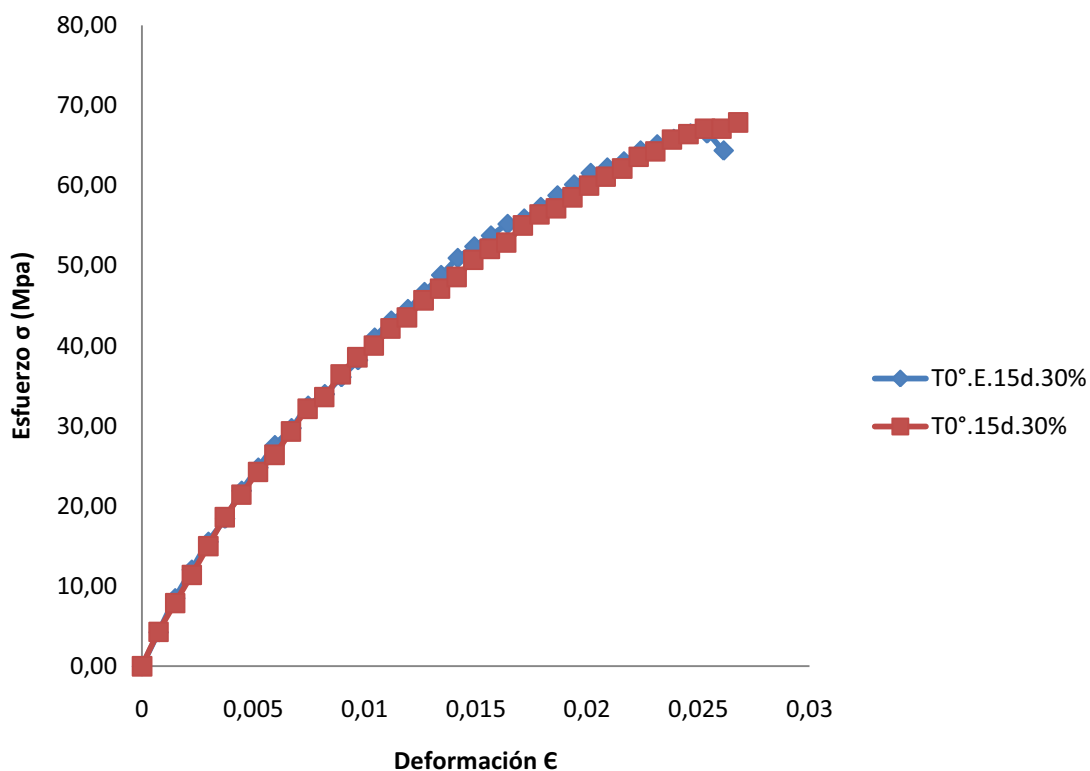


Figura 3.20. Curvas esfuerzo vs. deformación a la flexión de T0°.E.15d.30% y T0°.15d.30%.

En la Figura 3.20 se observan las graficas de esfuerzo vs deformación de dos configuraciones elaboradas con refuerzo tejido orientado a  $0^\circ$ . La diferencia radica en el uso de estireno como elemento constitutivo de la matriz. En la configuración  $T0^\circ.15d.30\%$  se alcanza un valor de esfuerzo máximo a la flexión de 69,75 MPa presentando un incremento del 5,69% con respecto a la configuración  $T0^\circ.E.15d.30\%$  que es la configuración con estireno en la matriz. El valor de módulo de elasticidad de la configuración  $T0^\circ.15d.30\%$  es de 4064,84 MPa, con lo cual se obtiene un aumento del 9,75% con respecto a la configuración  $T0^\circ.E.15d.30\%$ . El resultado obtenido sugiere que es beneficioso prescindir del estireno como elemento constitutivo de la matriz, ya que las propiedades de esfuerzo máximo a la tracción y rigidez se ven incrementadas.

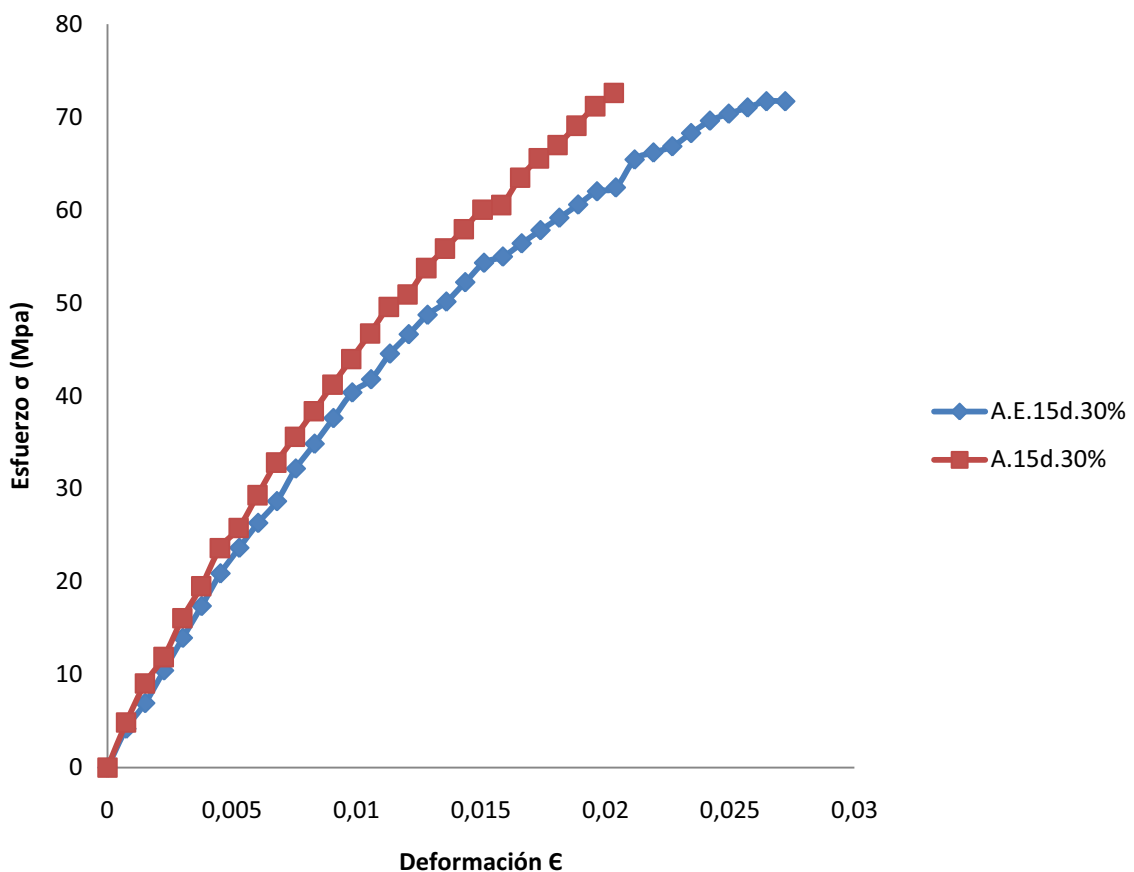


Figura 3.21. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones A.E.15d.30% y A.15d.30%.

En la Figura 3.21 se observan las gráficas de esfuerzo vs deformación de dos configuraciones elaboradas con refuerzo tejido alternado. La diferencia radica en

el uso de estireno como elemento constitutivo de la matriz. En la configuración A.15d.30% se alcanza un valor de esfuerzo máximo a la tracción de 74,16 MPa presentando un incremento del 2,29% con respecto a la configuración A.E.15d.30% que es la configuración con estireno en la matriz. El valor de módulo de elasticidad de la configuración A.15d.30% es de 4144,66 MPa, con lo cual se obtiene un aumento del 10,93% con respecto a la configuración A.E.15d.30%. El resultado obtenido sugiere que es beneficioso prescindir del estireno como elemento constitutivo de la matriz, ya que las propiedades de esfuerzo máximo a la tracción y rigidez se ven incrementadas.

La tendencia en ambos casos, con tejido a  $0^\circ$  y tejido alternado, es incrementar el esfuerzo máximo a la tracción y el módulo de elasticidad cuando se trabaja sin estireno. Cabe mencionar que la no utilización de estireno reduce los costos de fabricación del prototipo y simplifica el proceso de elaboración. Por lo tanto resulta beneficioso prescindir de este elemento como parte de la matriz poliéster.

Resumiendo los resultados obtenidos se tiene que el tejido brinda mejores resultados que el hilo, ya que se consiguen propiedades elevadas en dos direcciones de acción de la carga a diferencia del refuerzo longitudinal que solamente ofrece en una dirección. Al trabajar con refuerzo alternado las propiedades resultantes son superiores que las de sus orientaciones base de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ . Lo interesante de la configuración alternada es que se asemeja a un material isotrópico que es capaz de soportar el mismo esfuerzo en cualquier dirección.

Con respecto a los diferentes curados, utilizando temperatura durante el proceso se consigue incrementar el módulo elástico del material con una disminución mínima en el esfuerzo máximo a la flexión. Con este proceso se puede reducir el tiempo de curado de días a tan solo horas y mejorar la rigidez del compuesto. Finalmente, considerando al estireno se obtienen mejores resultados con incrementos en el esfuerzo máximo a la flexión y módulo elástico al prescindir de este elemento. Por consiguiente, se decide elaborar una probeta que cumpla con todos estos requerimientos con el fin de obtener el material con la mejor combinación de propiedades a flexión, coincidiendo con el material elaborado para tracción.

El nuevo material a realizarse es el A.16h.30% (alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40 °C y fracción volumétrica de 0,30). Este compuesto cumple todos los requisitos ya que utiliza refuerzo alternado con lo que se asemeja a un material isotrópico. No contiene estireno en la matriz por lo que las propiedades se incrementan, se simplifica el proceso de elaboración y se reducen costos. El curado es con temperatura de 40° que puede ser alcanzada artesanalmente, con lo cual se incrementa la rigidez y se disminuye el tiempo de producción de 15 días a únicamente 16 horas. Finalmente, la fracción volumétrica de refuerzo es de 0,30 con lo que se tiene un mayor porcentaje de degradabilidad en el material al final de la vida útil. En la Figura 3.22 se indican las curvas esfuerzo vs. deformación para las configuraciones A.16h.30% y resina poliéster.

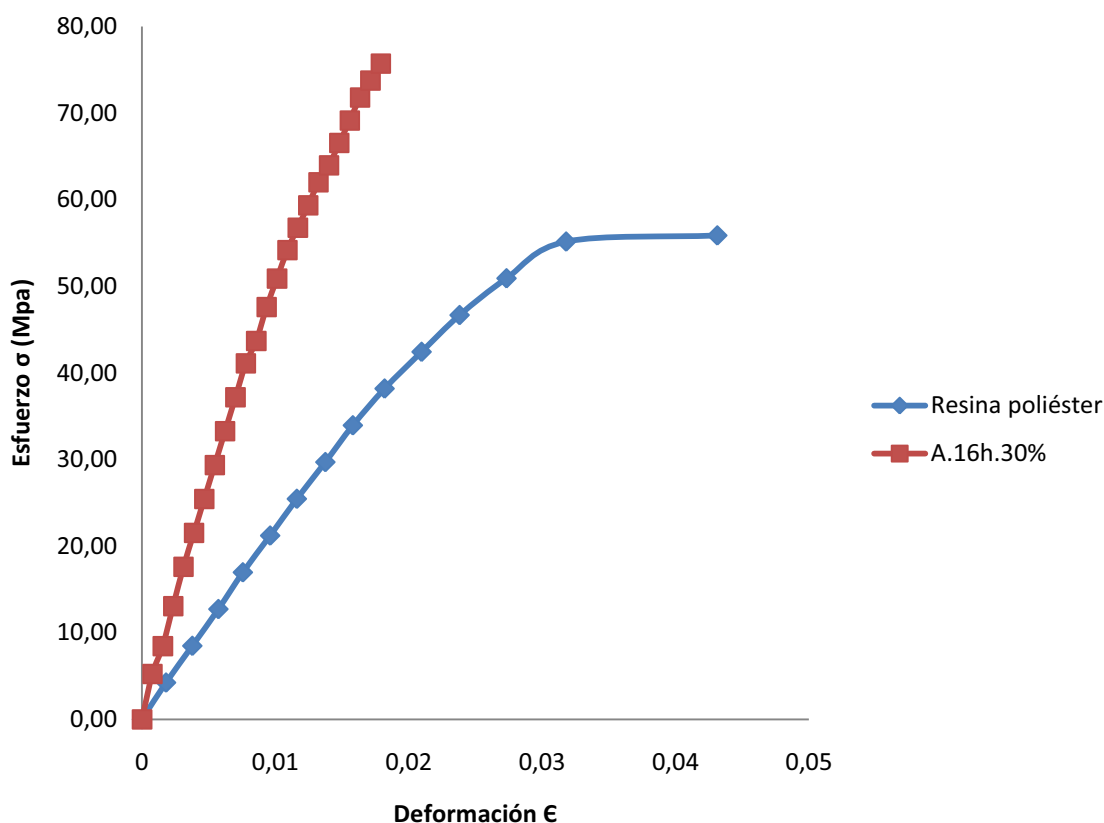


Figura 3.22. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las configuraciones A.16h.30% y resina poliéster.

En la Figura 3.22 se observa la gráfica de esfuerzo vs deformación de la configuración A.16h.30% comparada frente a la resina poliéster. El esfuerzo



máximo a la flexión para el nuevo material es de 76,29 MPa y del poliéster es de 56,62 MPa, obteniéndose un incremento del 34,8%. El valor de módulo de elasticidad de la configuración A.16h.30% es de 4434,10 MPa y de la resina es de 1867,82 MPa, consiguiendo un aumento del 137,4%. En la Figura 3.23 se pueden observar los módulos de elasticidad de ambos materiales.

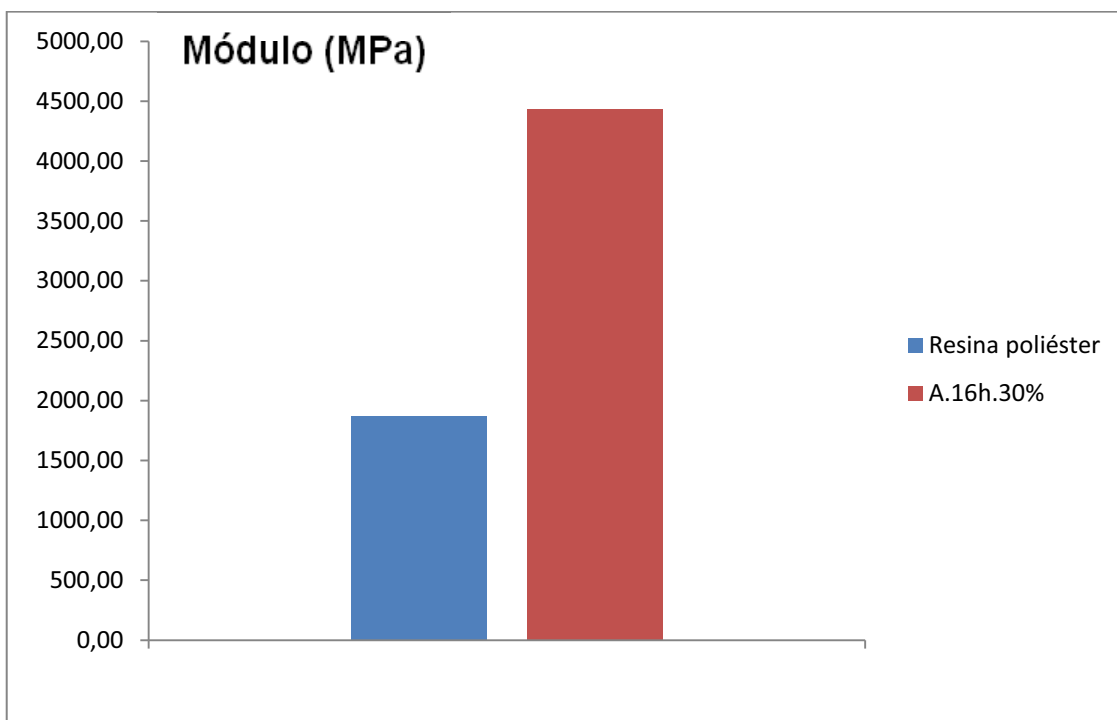


Figura 3.23. Módulo de elasticidad de las configuraciones A.16h.30% y resina poliéster.

Es importante mencionar que los valores de desviación estándar (S) y coeficiente de variación (CV) para esfuerzo máximo a tracción, módulo de elasticidad y deformación se pueden observar en la Tabla 3.3. Conjuntamente en la tabla mencionada se pueden apreciar los valores de densidad de los compuestos teniendo valores entre 1,08 y 1,12 g/cm<sup>3</sup> para el refuerzo continuo longitudinal de hilo de cabuya, y valores entre 1,22 y 1,25 g/cm<sup>3</sup> para el refuerzo tejido.

En la Figura 3.24 se presentan fotografías de las probetas ensayadas a flexión. Algunas de ellas presentaron fractura y otras no. En las que presentaron fractura se especifica si fue netamente de la matriz o matriz y fibra. Así se tiene la fractura en las configuraciones: L.E.15d.23%, L.E.15d.39%, T45°.E.15d.26%,

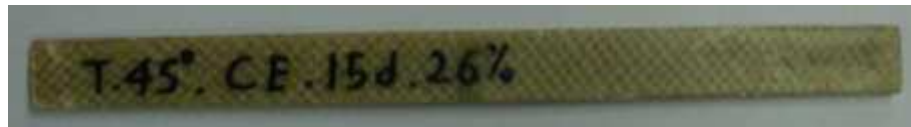
T45°.E.15d.30%, T0°.E.15d.26%, T0°.E.15d.30%, A.E.15d.30%, A.E.16h.30%,  
A.E.24h.30%, T0°.15d.30%, A15d.30% y A.16h.30%.



(a) No existió fractura en la probeta



(b) No existió fractura en la probeta



(c) No existió fractura en la probeta



(d) No existió fractura en la probeta



(e) No existió fractura en la probeta



(f) Tanto la matriz como la fibra se fracturan



(g) Tanto la matriz como la fibra se fracturan



(h) Tanto la matriz como la fibra se fracturan



(i) Tanto la matriz como la fibra se fracturan



(j) Tanto la matriz como la fibra se fracturan



(k) Tanto la matriz como la fibra se fracturan



(l) Tanto la matriz como la fibra se fracturan

Figura 3.24. Fracturas observadas en compuestos (a) L.E.15d.23%; (b) L.E.15d.39%; (c) T45°.E.15d.26%; (d) T45°.E.15d.30%; (e) T0°.E.15d.26%; (f) T0°.E.15d.30%; (g) A.E.15d.30%; (h) A.E.16h.30%; (i) A.E.24h.30%; (j) T0°.15d.30%; (k) A.15d.30%;(l) A.16h.30%.

### 3.2.3. ENSAYO DE IMPACTO

Una vez obtenidos los resultados de tracción y flexión se pudo observar que el material elaborado con tejido alternado, sin uso de estireno y con curado en estufa es el que presenta la mejor combinación de propiedades mecánicas ya que ofrece incrementos significativos en esfuerzo máximo a tracción y flexión, así como también un gran aumento en la rigidez tomando en cuenta su configuración

semejante a un material isotrópico. Por estas razones se elaboraron probetas para ensayos de impacto con la configuración A.16h (alternado sin estireno con curado a temperatura de 40°C durante 16 horas).

Para obtener la fracción volumétrica de refuerzo en este caso se realizaron una serie de ensayos preliminares. Estos ensayos permitieron determinar el número de capas adecuado para obtener un material con tejido alternado y que las dimensiones finales de las probetas se mantengan dentro de los estándares de la norma. Después de varios ensayos se encontró que el número de capas es igual a tres. La fracción volumétrica correspondiente es de 0,26.

El ensayo de impacto consiste en liberar una masa desde una altura determinada inicial que provoca la falla del material. A esta altura se aumenta un  $d_h$  si el material no falla y se disminuye un  $d_h$  si falla el material. Así se determina la altura a la que falla el 50% de los materiales. El cuadro realizado de este ensayo se puede apreciar en el Anexo 2. De estos ensayos de impacto se pudo determinar que el material A.16h.26% (alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40°C y fracción volumétrica de 0,26) absorbió una energía de 0,15 J que corresponde a un incremento del 114.29% con respecto a la resina poliéster, como se observa en la Figura 3.25.

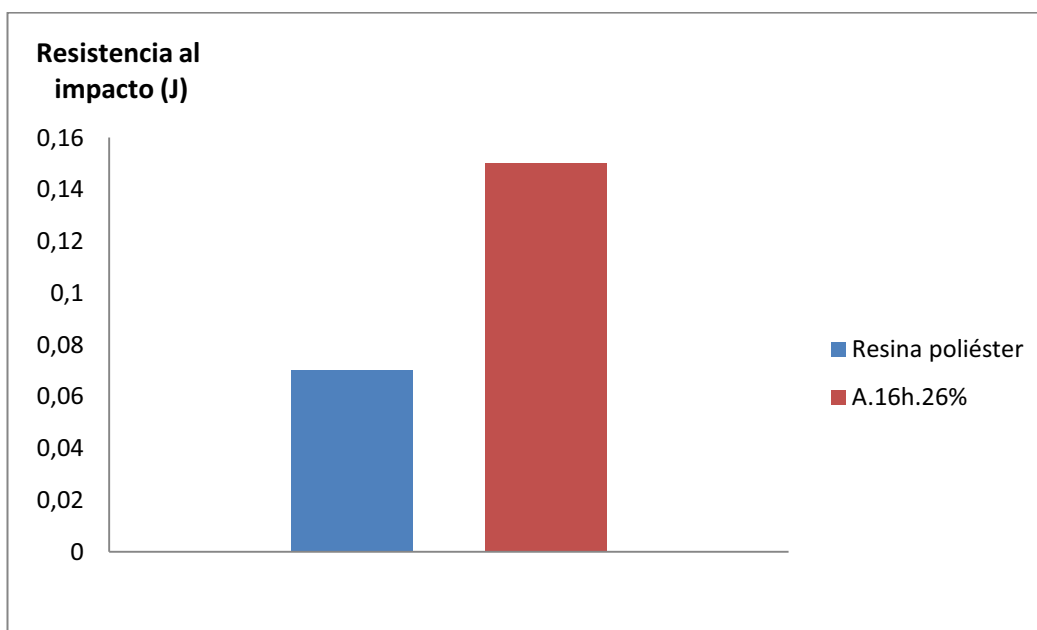
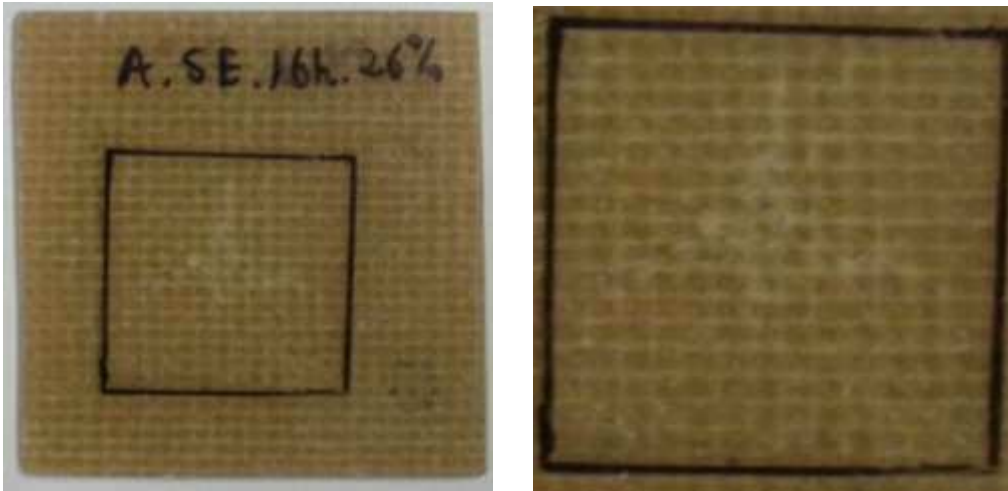


Figura 3.25. Resistencia al impacto de la resina poliéster y A.16h.26%.

En la Figura 3.26 se presentan fotografías de una probeta ensayada a impacto. Se puede observar claramente la falla producida netamente en la matriz debido al impacto de caída de dardo A.16h.26%.



Fractura producida netamente en la matriz

Figura 3.26. Falla observada en compuesto A.16h.26% ensayados a impacto.

### **3.3. COMPUESTOS DE POLIÉSTER-CABUYA FRENTE A OTROS MATERIALES COMPUESTOS**

En este apartado se comparan las propiedades y el desempeño de los materiales formulados con otros materiales compuestos con diferentes matrices y fibras de refuerzo. Algunos de los valores presentados pertenecen a estudios realizados como proyectos de titulación y tesis de grado de la EPN u otros valores referenciales obtenidos en bibliografía. Se elaboraran gráficos multieje para comparar los diferentes materiales expuestos en las tablas y además, si los datos lo permiten, se compararán las propiedades específicas.

### 3.3.1. COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Con el fin de conocer el comportamiento de la cabuya como refuerzo dentro del poliéster se realiza la comparación frente otros compuestos de la misma matriz, pero con diferente fibra natural. En este caso, se tienen las fibras de abacá y de coco en diferentes configuraciones. Los valores de las propiedades mecánicas de los compuestos con matriz poliéster pueden observarse en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con diferentes fibras naturales.

Configuración	Esfuerzo max a tracción	Módulo a tracción	Esfuerzo max a flexión	Módulo a flexión	Densidad
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Resina poliéster	28,7	1492,4	56,6	1867,8	1,200
Fibra 10mm abacá 0,30 <sup>[25]</sup>	29,8	5323,0	47,5	2685,0	---
Fibra longitudinal abacá 0,35 <sup>[25]</sup>	137,0	3990,0	109,9	4605,0	---
Tejido plano abacá 0,20 <sup>[10]</sup>	62,1	2384,8	---	---	1,204
Tejido sarga abacá 0,20 <sup>[10]</sup>	58,1	2304,2	---	---	1,204
Fibra corta coco 0,15 <sup>[27]</sup>	17,2	1843,5	44,7	2011,1	1,160
Fibra longitudinal cabuya 0,39	74,3	4025,6	61,8	2953,5	1,080
Tejido 0° cabuya 0,34/0,30*	67,7	5421,7	69,8	4064,8	1,230
Tejido alternado cabuya 0,34/0,30*	60,6	6508,2	76,3	4434,1	1,230
Fibra de yute 22%wt <sup>[26]</sup>	84,0	12000,0	125,0	8000,0	---
Fibra longitudinal de sisal 40%wt <sup>[34]</sup>	129,0	8500,0	192,0	7500,0	---
Fibra longitudinal de banana 30%wt <sup>[34]</sup>	121,0	8000,0	---	---	---
Fibra longitudinal de coco 30%wt <sup>[34]</sup>	45,0	4000,0	56,0	4000,0	---
Fibra corta de sisal 40%wt <sup>[34]</sup>	34,5	1900,0	86,4	---	---
Fibra corta de banana 30%wt <sup>[34]</sup>	43,5	2300,0	92,0	---	---
Fibra corta de coco 30%wt <sup>[34]</sup>	14,0	1400,0	31,2	---	---
Fibra de yute <sup>[34]</sup>	44,3	2880,0	60,1	2970,0	1,250
Fibra de vidrio <sup>[34]</sup>	117,4	6080,0	138,2	4020,0	1,450

\*La fracción volumétrica de 0,34 corresponde a los ensayos de tracción y la de 0,30 a los de flexión.



De acuerdo con la tabla anterior, los compuestos con configuraciones de fibra continua, como son el caso de la fibra longitudinal y tejida, presentan propiedades muy superiores a los compuestos de fibra corta debido a que se tiene una mejor distribución del refuerzo. Ahora, comparando entre fibras, se puede observar que las fibras longitudinales de abacá, yute y sisal presentan propiedades superiores a la fibra longitudinal de cabuya, esto puede deberse a que la cabuya ha sido maltratada durante el proceso de hilado. Ha pasado por procesos de lavado, secado e hilado con torsión que van debilitando la resistencia a tracción de la cabuya, además, dentro de la matriz no todos los hilos de cabuya actúan distribuyendo el esfuerzo. Por otro lado, comparando los compuestos reforzados con fibra tejida, se puede apreciar que el tejido de cabuya presenta un mejor comportamiento que el tejido de abacá tanto en esfuerzo máximo a tracción, como en módulo de elasticidad, que son los datos que se pueden comparar, esto es debido a que el tejido de cabuya tiene una mejor distribución de trama y urdimbre, con mayor uniformidad ya que es producido en un proceso semiautomático a gran escala para uso artesanal dentro del mercado ecuatoriano. Para una rápida visualización, en la Figura 3.27 se puede apreciar un gráfico multieje y en la Figura 3.28 se presentan los gráficos de resistencia específica a la tracción vs. el módulo específico de diferentes compuestos de matriz poliéster.

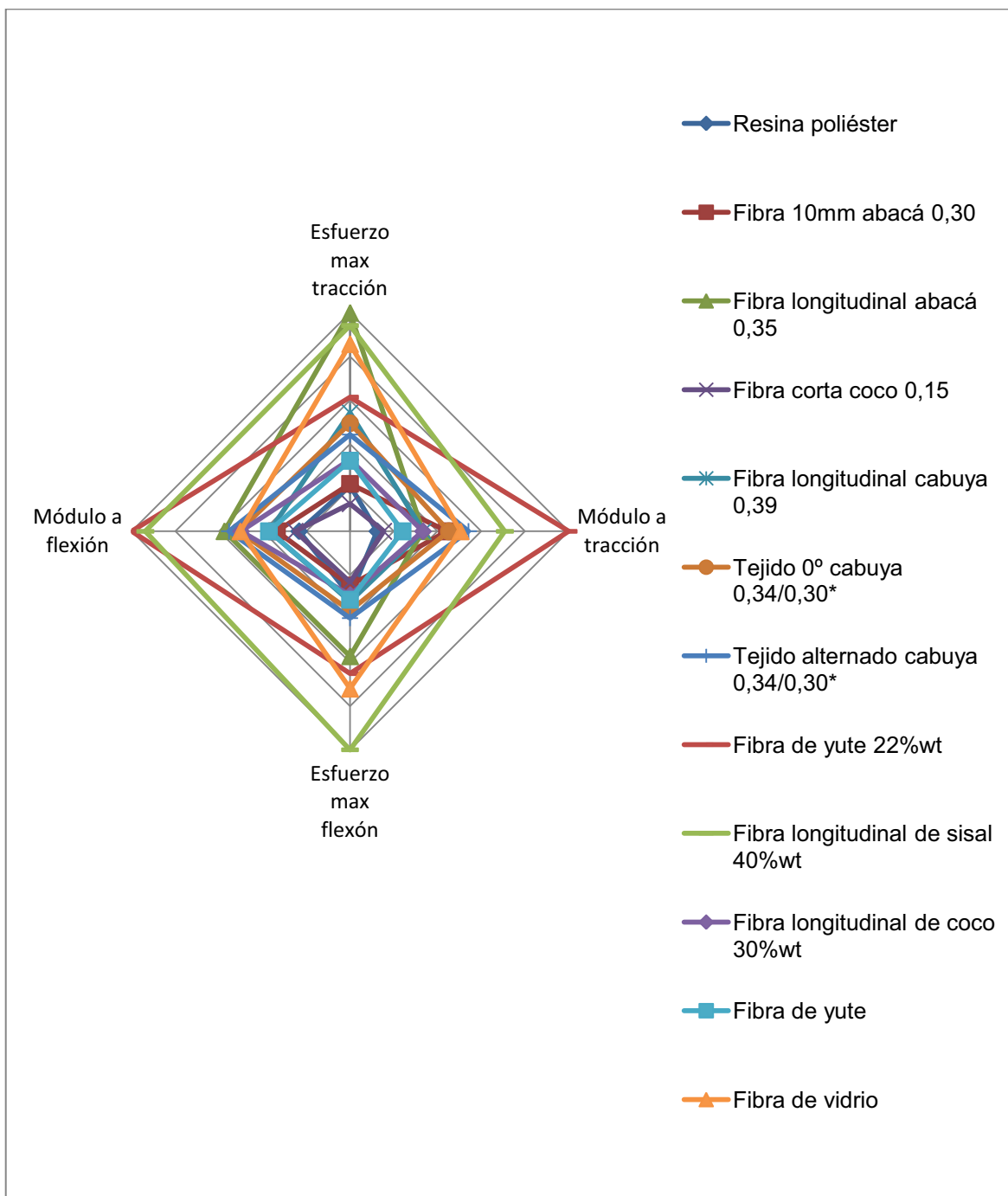


Figura 3.27. Gráfico multiteje de compuestos elaborados con matriz poliéster reforzados con fibras naturales.

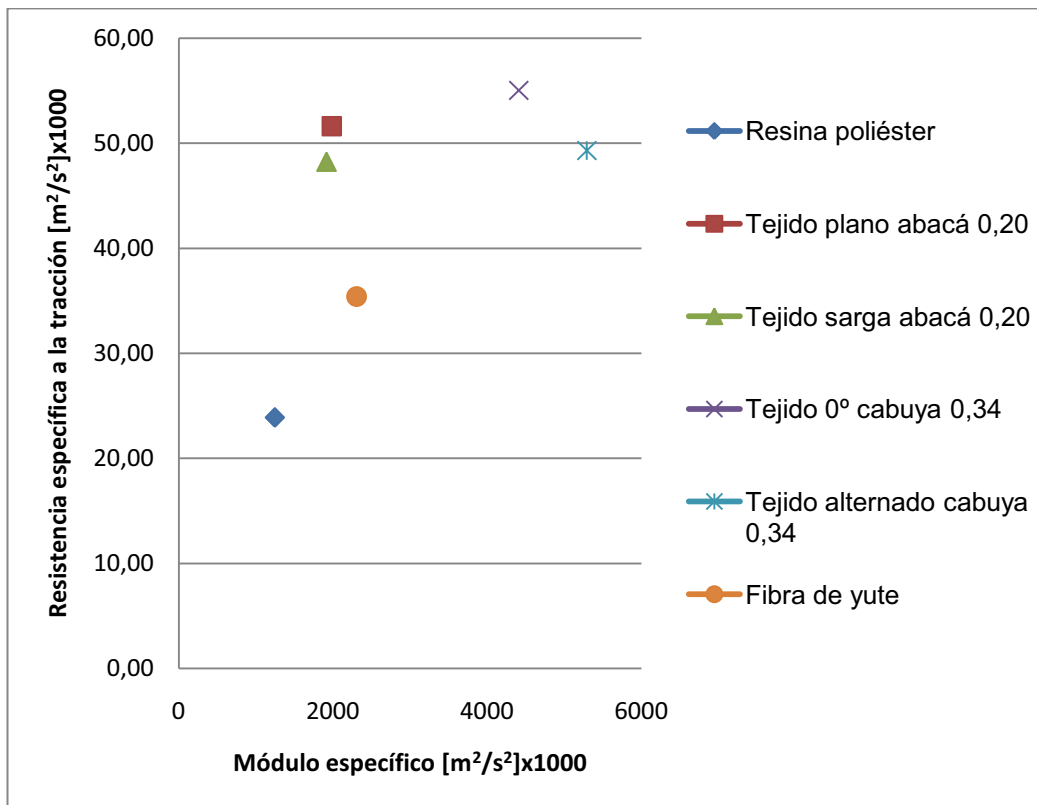


Figura 3.28. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos de matriz poliéster reforzados con tejidos de cabuya y abacá.

### 3.3.2. COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTER

Dentro de los estudios realizados en la EPN acerca de compuestos híbridos con matriz de poliéster, se tienen: abacá-fibra de vidrio y coco-fibra de vidrio. La comparación del compuesto poliéster-cabuya frente a estos compuestos híbridos se realiza con el fin de conocer, cuál sería el potencial incremento de las propiedades al introducir fibra de vidrio dentro de la matriz. El resumen de propiedades mecánicas se muestra en la Tabla 3.6. En esta tabla también se toman en cuenta datos obtenidos en bibliografía.

Tabla 3.6. Propiedades mecánicas de las mejores configuraciones de compuestos híbridos con matriz poliéster.

Configuración	Esfuerzo max a tracción	Módulo a tracción	Esfuerzo max a flexión	Módulo a flexión	Densidad
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Resina poliéster	28,7	1492,4	56,6	1867,8	1,2
Fibra de vidrio 0,15 <sup>[27]</sup>	74,0	5330,3	111,1	4482,7	1,4
Fibra corta coco 0,15 Fc50-Fv50 <sup>[27]</sup>	38,6	3960,0	89,2	4094,9	1,2
Fibra corta abacá 0,20 25A/75V <sup>[10]</sup>	69,8	2770,4	84,0	3420,2	1,4
Fibra longitudinal abacá 0,20 75A/25V <sup>[10]</sup>	137,8	4472,6	126,7	5091,0	1,3
Tejido plano abacá 0,20 25A/75V <sup>[10]</sup>	94,1	2941,4	109,1	4109,6	1,4
Tejido sarga abacá 0,20 25A/75V <sup>[10]</sup>	78,5	2683,0	80,0	3036,6	1,4
Fibra longitudinal cabuya 0,39	74,3	4025,6	61,8	2953,5	1,1
Tejido 0° cabuya 0,34/0,30*	67,7	5421,7	69,8	4064,8	1,2
Tejido alternado cabuya 0,34/0,30*	60,6	6508,2	76,3	4434,1	1,2
Fibra de vidrio 38%/fibra de yute 10%wt <sup>[26]</sup>	200,0	18000,0	229,0	18000,0	---
Fibra de vidrio 69% <sup>[26]</sup>	391,0	39000,0	816,0	33000,0	---
Fibra de vidrio <sup>[26]</sup>	117,4	6080,0	138,2	4020,0	---
Fibra de vidrio 30% <sup>[32]</sup>	100,0	6000,0	---	---	1,4
Fibra de vidrio 65% <sup>[32]</sup>	300,0	15000,0	---	---	1,9

\*La fracción volumétrica de 0,34 corresponde a los ensayos de tracción y la de 0,30 a los de flexión.

En la tabla anterior se pueden apreciar los valores de las mejores configuraciones híbridas desarrolladas en el laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) conjuntamente con datos recopilados bibliográficamente. Si se centra la atención en los refuerzos continuos, se puede advertir que los refuerzos híbridos de abacá presentan propiedades mecánicas superiores a los compuestos poliéster-cabuya respectivos, es decir, el compuesto híbrido con matriz poliéster y refuerzo longitudinal de fibra de abacá-fibra de vidrio presenta valores mayores de esfuerzo máximo a tracción y a flexión comparados frente al compuesto con refuerzo longitudinal poliéster-cabuya, y así respectivamente. Ahora, tomando en cuenta los compuestos con alto contenido de fibra de vidrio, se logra apreciar que las propiedades son altamente mayores a los demás compuestos, por ejemplo, el compuesto poliéster-fibra de vidrio con 0,69 de fracción volumétrica es el que presenta la mayor resistencia tanto a tracción, flexión y rigidez. El compuesto fibra de vidrio 38% y fibra de yute 10%wt, presenta propiedades elevadas producto de la combinación de una fibra natural con una sintética indicando el potencial de los refuerzos híbridos. Por otro lado, se puede realizar un análisis en los compuestos desarrollados en

el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) acerca del potencial incremento de los compuestos al introducir fibra de vidrio como refuerzo complementario a la fibra de vidrio. En la Tabla 3.7 se presentan los incrementos de las propiedades mecánicas de los materiales híbridos con respecto a sus configuraciones base de fibra natural.

Tabla 3.7. Incrementos de las propiedades mecánicas en configuraciones de compuestos híbridos con matriz poliéster con relación a los compuestos con refuerzo de la fibra natural respectiva.

Configuración	Incrementos			
	Esfuerzo max a tracción [%]	Módulo a tracción [%]	Esfuerzo max a flexión [%]	Módulo a flexión [%]
<b>Fibra corta coco 0,15 Fc50-Fv50</b>	124,3	114,8	99,7	103,6
<b>Fibra corta abacá 0,20 25A/75V</b>	180,2	2,3	76,8	27,4
<b>Fibra longitudinal abacá 0,20 75A/25V</b>	55,5	4,7	15,3	10,6
<b>Tejido plano abacá 0,20 25A/75V</b>	51,4	23,3	---	---
<b>Tejido sarga abacá 0,20 25A/75V</b>	35,3	16,4	---	---

Como se puede examinar en la tabla anterior, los incrementos se pronuncian en todas las configuraciones y en todas las propiedades, sin importar si el tipo fibra es corta, longitudinal o tejida. En algunas configuraciones, como por ejemplo la fibra corta de abacá, se logra un incremento del 180,2% en esfuerzo máximo a tracción. De igual manera, en la fibra corta de coco se tiene un incremento del 124,3%. En cuanto a los tejidos, el aumento no es tan sustancioso pero no es despreciable con valores entre 35 y 52% para el esfuerzo máximo a tracción. Para observar de una mejor manera, en la Figura 3.29 se puede apreciar un gráfico multiteje y en la Figura 3.30 se presentan los gráficos de resistencia específica a la tracción vs el módulo específico de los diferentes tejidos.

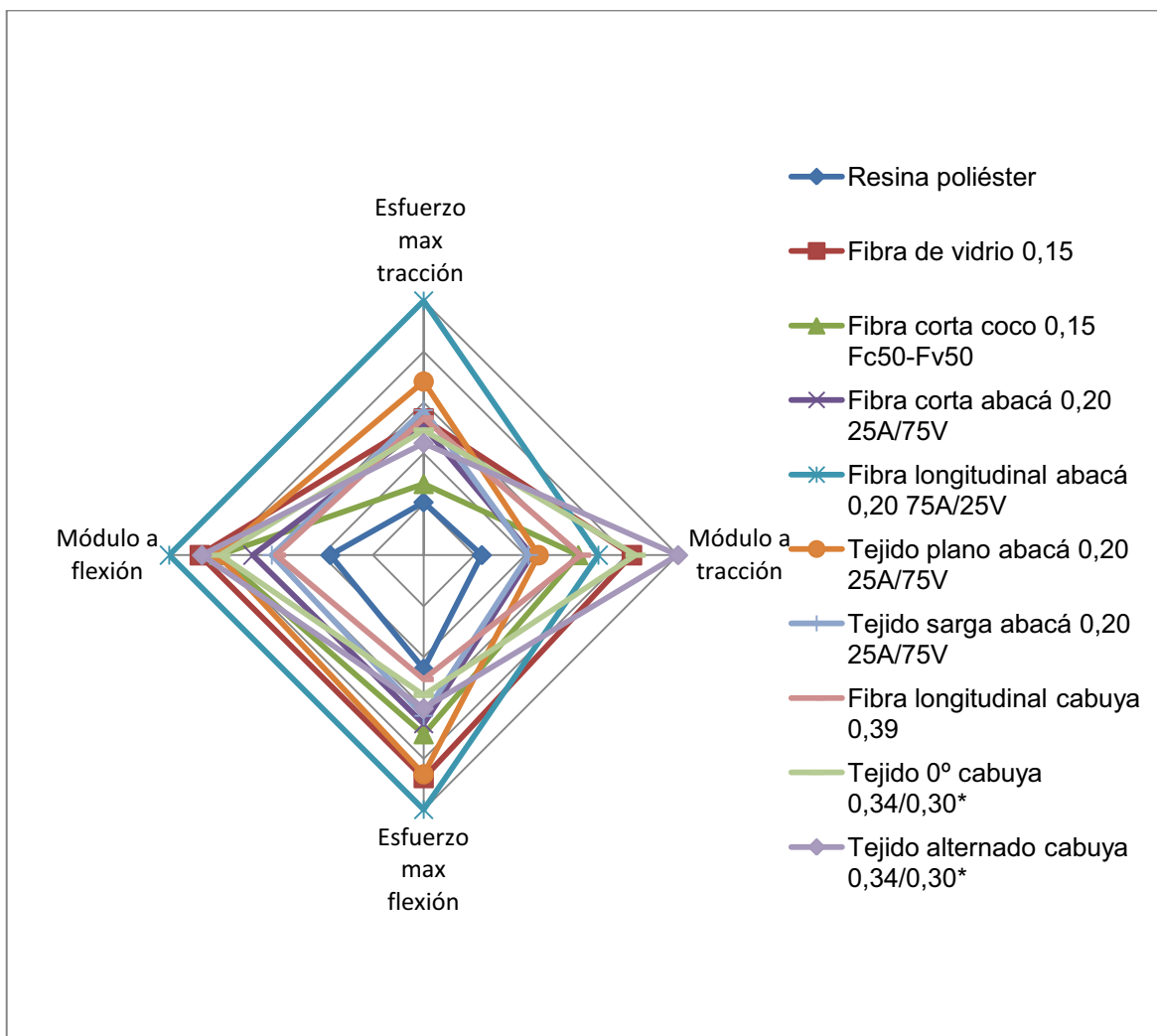


Figura 3.29. Gráfico multiteje de compuestos híbridos elaborados con matriz de poliéster reforzados con fibras naturales y fibra de vidrio, compuestos poliéster-cabuya, poliéster y poliéster-fibra de vidrio.

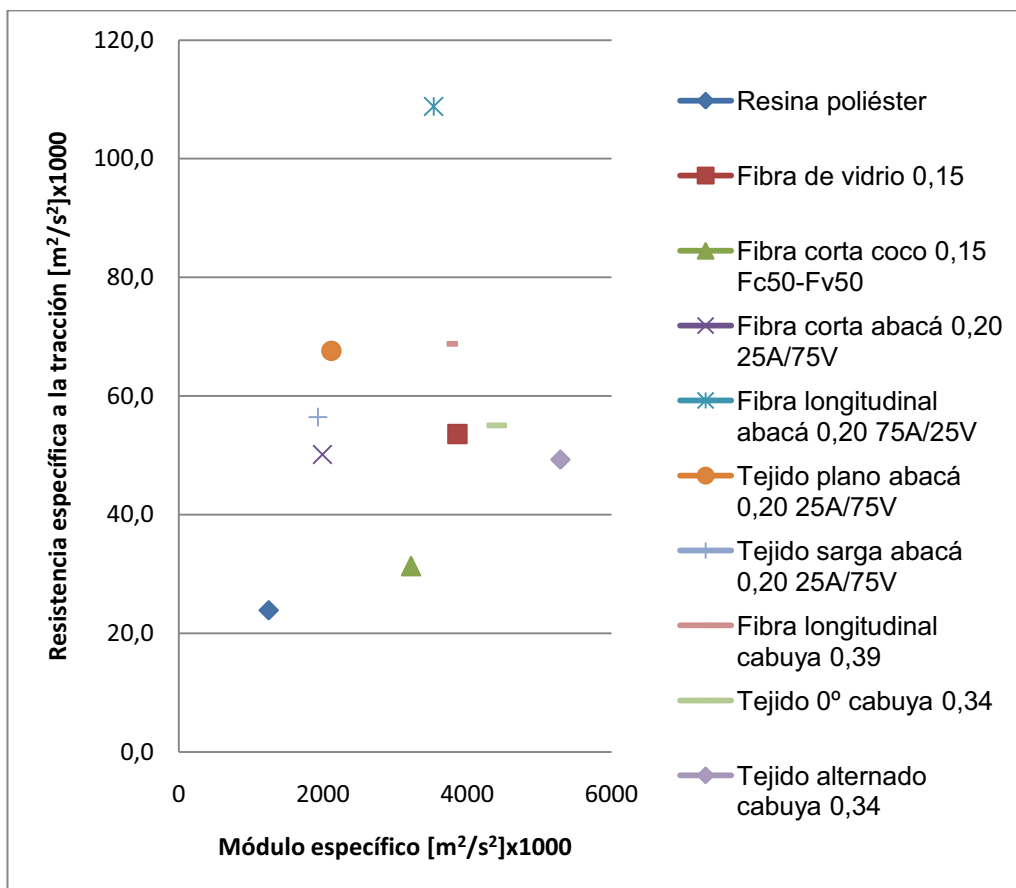


Figura 3.30. Resistencia específica a la tracción vs. módulo específico de compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y fibra de vidrio, compuestos poliéster-cabuya, poliéster-fibra de vidrio y poliéster.

De esta manera se puede concluir que valdría la pena la introducción de fibra de vidrio como refuerzo conjuntamente con la fibra natural de cabuya para formar un compuesto híbrido y se obtendrían propiedades altamente superiores, aunque por otro lado se verían afectadas las condiciones biodegradables de la fibra natural, ya que se vería reducido su porcentaje de refuerzo que a su vez disminuye el atractivo del material.

En cuanto a la energía absorbida al impacto mediante caída de dardo, en la Tabla 3.8 se presentan los valores de energía absorbida y los incrementos de las diferentes configuraciones con respecto a la matriz de resina poliéster.

Tabla 3.8. Energía absorbida al impacto de compuestos híbridos con matriz poliéster, poliéster, poliéster-fibra de vidrio, poliéster-cabuya y los respectivos incrementos con respecto a la matriz de poliéster.

Configuración	Energía de falla	Incremento
	[J]	[%]
Resina poliéster	0,07	---
Fibra de vidrio 0,20	0,508	625,7
Fibra corta coco 0,15 Fc50-Fv50	0,323	361,4
Fibra longitudinal abacá 0,20 75A/25V	0,492	602,9
Tejido alternado cabuya 0,26	0,15	114,3

Se puede notar que el compuesto de fibra de vidrio es el que presenta el mayor valor de energía de falla con un incremento del 625,7% respecto de la matriz poliéster, seguido de los compuestos híbridos con valores cercanos. El compuesto poliéster-cabuya apenas presenta un incremento del 114,3 %, nada despreciable pero relativamente bajo. En complemento con los valores obtenidos a tracción y flexión, la fibra de vidrio es una excelente opción en combinación con las fibras naturales para incrementar las propiedades mecánicas.

### 3.3.3. COMPARACIÓN FRENTE A COMPUESTOS DE OTRAS MATRICES

Con el objetivo de conocer relativamente el comportamiento del material objeto del presente estudio, poliéster-cabuya, frente a compuestos con matrices diferentes, en este apartado se realiza una comparación de las propiedades mecánicas a tracción y flexión. Estas propiedades pueden observarse en la Tabla 3.9 y más rápidamente en el gráfico multieje de la Figura 3.31.



Tabla 3.9. Propiedades mecánicas de compuestos poliéster-cabuya y compuestos de otras matrices.

Matriz	Refuerzo	Fracción volumétrica	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo a tracción [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Módulo a flexión [MPa]
Polietileno <sup>[28]</sup>	Fibra corta de abacá 30mm	0,35	15,0	406,0	19,0	252,0
Polietileno <sup>[28]</sup>	Fibra longitudinal abacá	0,35	102,0	1667,0	38,0	507,0
pp <sup>[29]</sup>	Fibra corta de abacá 30mm	0,35	37,0	1278,0	52,0	1952,0
pp <sup>[29]</sup>	Fibra longitudinal abacá	0,35	87,0	2400,0	124,0	5175,0
pp <sup>[30]</sup>	Fibra corta de abacá 20mm/fibra de vidrio	0,25 75%A25%V	78,0	5224,4	52,9	5288,4
pp <sup>[30]</sup>	Fibra longitudinal abacá/fibra de vidrio	0,25 50%A50%V	139,8	11096,4	74,8	4415,2
pp <sup>[32]</sup>	Fibra de vidrio	0,30	90,0	4500,0	---	---
pp <sup>[33]</sup>	Bambú	0,20	16,0	2500,0	---	---
pp <sup>[33]</sup>	Caña de azúcar	0,20	16,0	600,0	---	---
pp <sup>[33]</sup>	Madera	0,30	38,0	---	---	---
PLA <sup>[31]</sup>	Fibra corta de abacá 10mm	0,13	38,0	3980,0	61,0	3592,0
PLA <sup>[31]</sup>	Fibra longitudinal abacá	0,20	132,0	9223,0	104,4	5570,0
PLA <sup>[33]</sup>	Lyocell	0,621 wt	100,5	5550,0	---	---
PLA <sup>[33]</sup>	Lino	0,20	66,0	5700,0	---	---
Poliéster	Fibra longitudinal abacá	0,39	74,3	4025,6	61,8	2953,5
Poliéster	Tejido 0° de cabuya	0,34/0,30*	67,7	5421,7	69,8	4064,8
Poliéster	Tejido alternado de cabuya	0,34/0,30*	60,6	6508,2	76,3	4434,1
Epoxy <sup>[26]</sup>	Yute 14%wt/vidrio 40%wt	---	238,0	31000,0	624,0	28000,0
Epoxy <sup>[26]</sup>	Fibra de vidrio	0,68	429,0	41000,0	938,0	37000,0
Epoxy <sup>[32]</sup>	Fibra de vidrio	0,60	400,0	24000,0	---	---
PHB <sup>[33]</sup>	Lino	0,20	64,4	6197,0	---	---
PHB <sup>[33]</sup>	Piña	0,20 wt	46,0	2158,0	---	---
Poliuretano <sup>[33]</sup>	Cáñamo	0,19	27,0	3000,0	---	---
Biopol <sup>[33]</sup>	Yute	0,25 wt	33,6	---	---	---
Biopol <sup>[33]</sup>	Paja	0,30 wt	14,0	1700,0	---	---

En la tabla anterior se puede observar que el compuesto que presenta las mejores propiedades es el de matriz epoxy con fibra de vidrio con valores muy

superiores a los demás compuestos, sobre todo frente a los poliéster-cabuya. El siguiente mejor compuesto es el híbrido de matriz epoxy con refuerzo vidrio-yute, cabe mencionar que la matriz es un termoestable. Los compuestos de cabuya presentan valores bajos, inferiores a muchos de los compuestos presentes en la Tabla 3.9, pero se debe tomar en cuenta la facilidad de fabricación del material ya que la fibra no debe ser procesada, debido a su presencia en el mercado local como producto terminado.

A continuación se presenta un gráfico multiteje para comparar las propiedades a tracción y flexión de los compuestos desarrollados en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM).

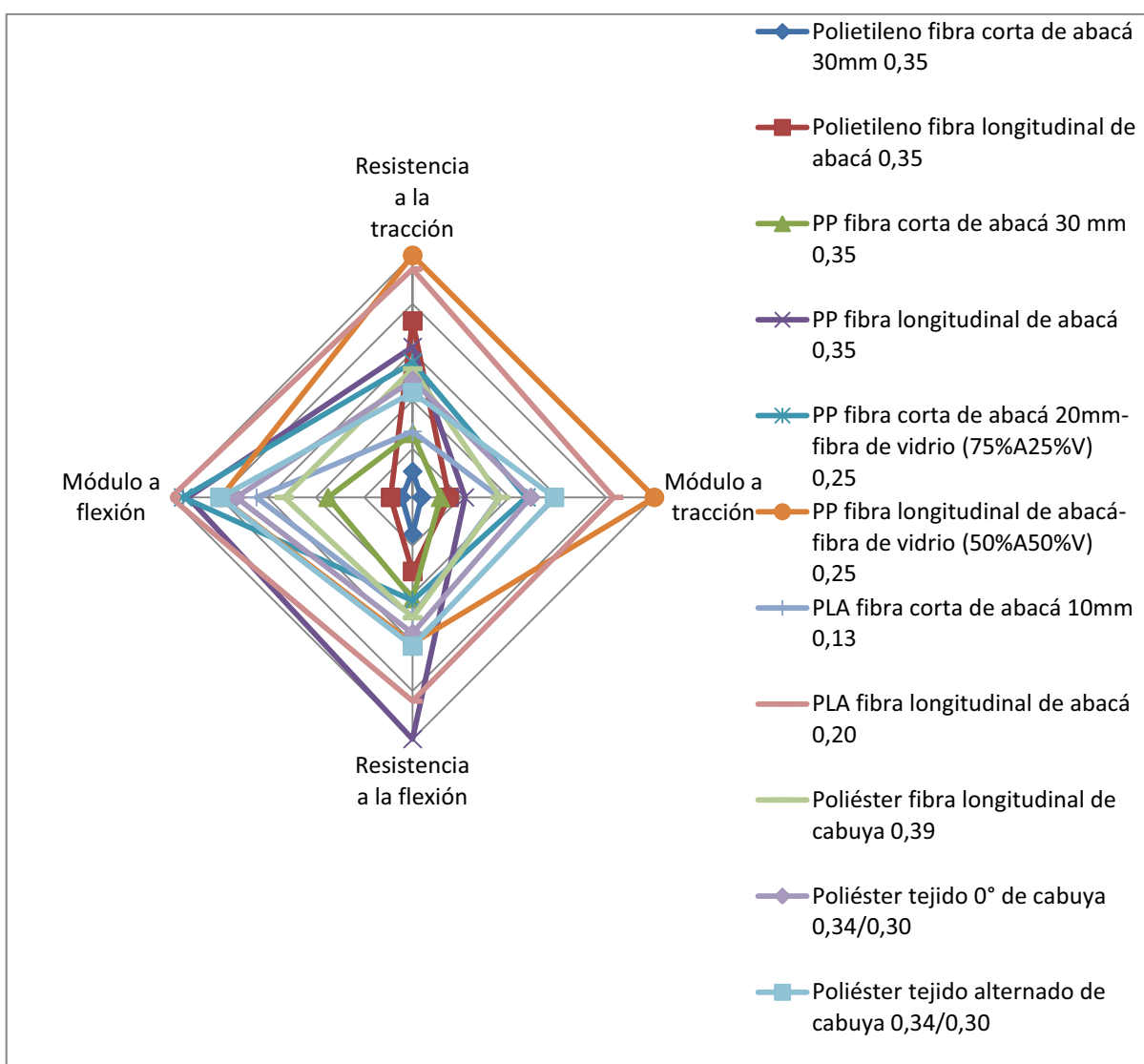


Figura 3.31. Gráfico multiteje de compuestos poliéster cabuya y compuestos de otras matrices.

Analizando los valores se tiene que los compuestos poliéster-cabuya poseen propiedades superiores que los compuestos de otras matrices con fibra corta, esto se debe a que el refuerzo continuo distribuye de mejor manera la carga permitiendo soportar un mayor esfuerzo. Con respecto a las configuraciones de refuerzo continuo muestran valores inferiores de resistencia tanto a tracción como a flexión. Ahora, entre todas las configuraciones, la que presenta las mejores propiedades, ya que posee un área mayor en gráfico, es el compuesto con matriz de ácido poliláctico y fibra longitudinal de abacá. Debido a esto, sería recomendable investigar el uso de esta matriz para ser reforzada con fibra de cabuya en configuraciones continuas tejidas para obtener compuestos completamente verdes con comportamiento más isotrópico.

### **3.3.4. COMPARACIÓN DE PROCESAMIENTO DE LAS DIFERENTES FIBRAS NATURALES**

#### **(i) Fibra de abacá**

La fibra de abacá está disponible en forma de atados de longitudes entre 4 m y 6m, por lo que sobrepasan las dimensiones que se necesitan para preparar las láminas de material compuesto, por tanto, con la ayuda de tijeras se obtienen longitudes diferentes de fibra de abacá: fibra corta y fibra continua, de acuerdo a las dimensiones planteadas para este estudio.

#### *Preparación de fibra corta de abacá*

Para este proceso, se requirió en primera instancia, fibra de aproximadamente 500 mm, con el objeto de remover secciones pilosas y de diámetros fuera del rango establecido para la calidad 3 de fibra de abacá. Luego, se cortó fibra de 10 y 20 mm de longitud y se tamizó para eliminar formaciones grumosas (tamiz ASTM E-11No) y distribuir las uniformemente en la placa de material compuesto híbrido.

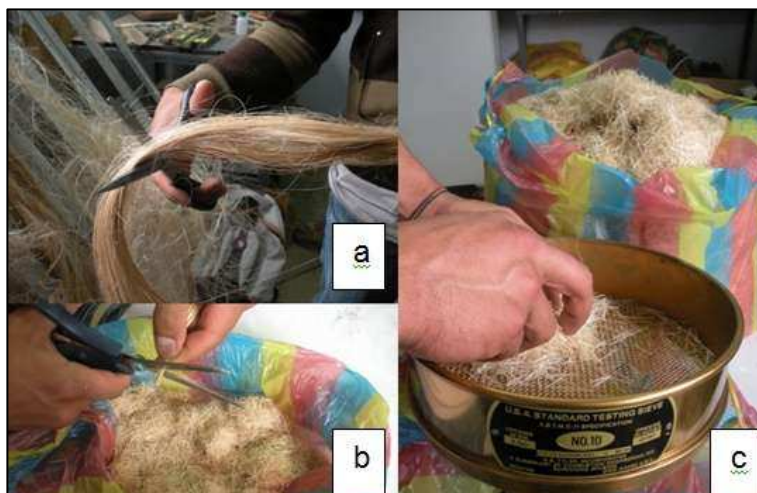


Figura 3.32. Preparación de fibra corta de abacá; (a) corte de una sección de fibra; (b) selección y corte de fibra a la dimensión deseada; tamizado de fibra. [30]

#### *Análisis de humedad y secado de fibras de abacá*

Se realizaron pruebas preliminares con fibras secas y sin secar, con el propósito de determinar el efecto del contenido de humedad en la fibra de abacá en la obtención de láminas de material compuesto híbrido. Los valores de temperatura y el tiempo que se experimenta para secar la fibra de abacá se indican en la Tabla 3.10. Además, no se realizó un proceso previo de humidificación de la fibra de abacá.

Tabla 3.10. Valores de temperatura y tiempo de secado para la fibra corta de abacá. [30]

Temperatura (°C)	Tiempo (h)
90	12
80	6
70	2

#### *Preparación de fibras continuas longitudinales de abacá*

Para esta configuración de fibra de abacá, se cortaron grupos de fibras de 300 mm para luego proceder a atar uno de los extremos y posteriormente lavarlos, retirando pilosidades y fibras de diámetros que no pertenecen a la calidad 3, luego se procura alisarlo mientras se va estirando desde el primer atado hacia abajo, para posteriormente atar su otro extremo e inmediatamente trasladarlo a la estufa

para realizar su secado. En la Figura 3.33 se pueden apreciar los pasos de procesamiento para la fibra continua y son: (a) corte de un mechón de la fibra a 300mm, (b) lavado y remoción de pilosidades, (c) ajuste de los extremos del mechón luego del lavado, (d) mechones de abacá en el interior de la estufa para su posterior secado.

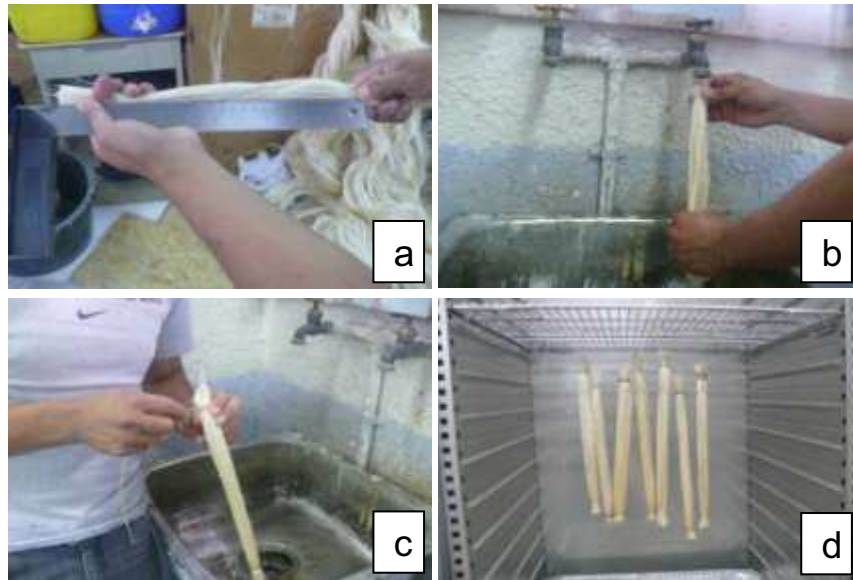


Figura 3.33. Preparación de fibra continua de abacá. [30]

Las fibras continuas se sometieron a un proceso de secado similar al anterior con la diferencia de que en este caso los parámetros de temperatura y tiempo son mayores debido a su mayor contenido de humedad. Este proceso se realizó a 70°C durante 12 h. Este lavado y secado permitirá que las fibras continuas de abacá mantengan una forma alisada.

#### *Preparación de fibra continua tejida de abacá*

Dentro del refuerzo continuo se tiene la fibra tejida, en este caso, tejido plano y sarga de abacá. Su elaboración conlleva gran trabajo para formar la trama y urdimbre en un telar manual que se puede observar en la Figura 3.34.



Figura 3.34. Telar manual. [10]

Para la elaboración de los tejidos se siguió el proceso que se describe a continuación:

- Escoger las fibras de mayor longitud y diámetro.
- Formar grupos de diez fibras, pues esto facilitará su colocación en la caja de encolado y la máquina engomadora evitando que se enreden.
- Colocar las fibras encoladas en el árbol de la urdimbre. Este árbol es rotativo y por lo tanto se debe asegurar los extremos haciendo coincidir los trinquetes en los extremos.
- Pasar los hilos por la guía y atravesarlos por los ojos de las mallas, alternado entre cada lizo como se muestra en la Figura 3.35.



Figura 3.35. Colocación de las fibras en las mallas de cada lizo. [10]

- Tensar las fibras y envolver las fibras en la urdimbre.
- Asegurar las fibras en el árbol de tejido.
- Pasar la trama con cuidado para evitar que las fibras pierdan tensión.
- Ajustar la trama empujando el peine hacia la trama hasta ceñirla y colocarla junto al tejido.
- Recoger el tejido terminado en el árbol de tejido.

## **(ii) Fibra de coco**

Esta fibra natural se obtiene de la corteza de la planta de coco, y representa el 35% del total de la fruta. El 90% de la corteza está constituida principalmente por lignina y celulosa. La fibra de coco es extraída de la cascara del fruto de coco o mesocarpo. La cascara se extrae del fruto de forma manual utilizando una punta fija o un cuchillo. Para poder utilizar esta fibra dentro del compuesto, debe pasar por un proceso de extracción que puede ser manual, con grata o en trituradora. De estos tres métodos, el mejor, según el estudio realizado por Favio Delgado, es el de trituradora, el cual se basa en el diagrama que se observa en la Figura 3.36.

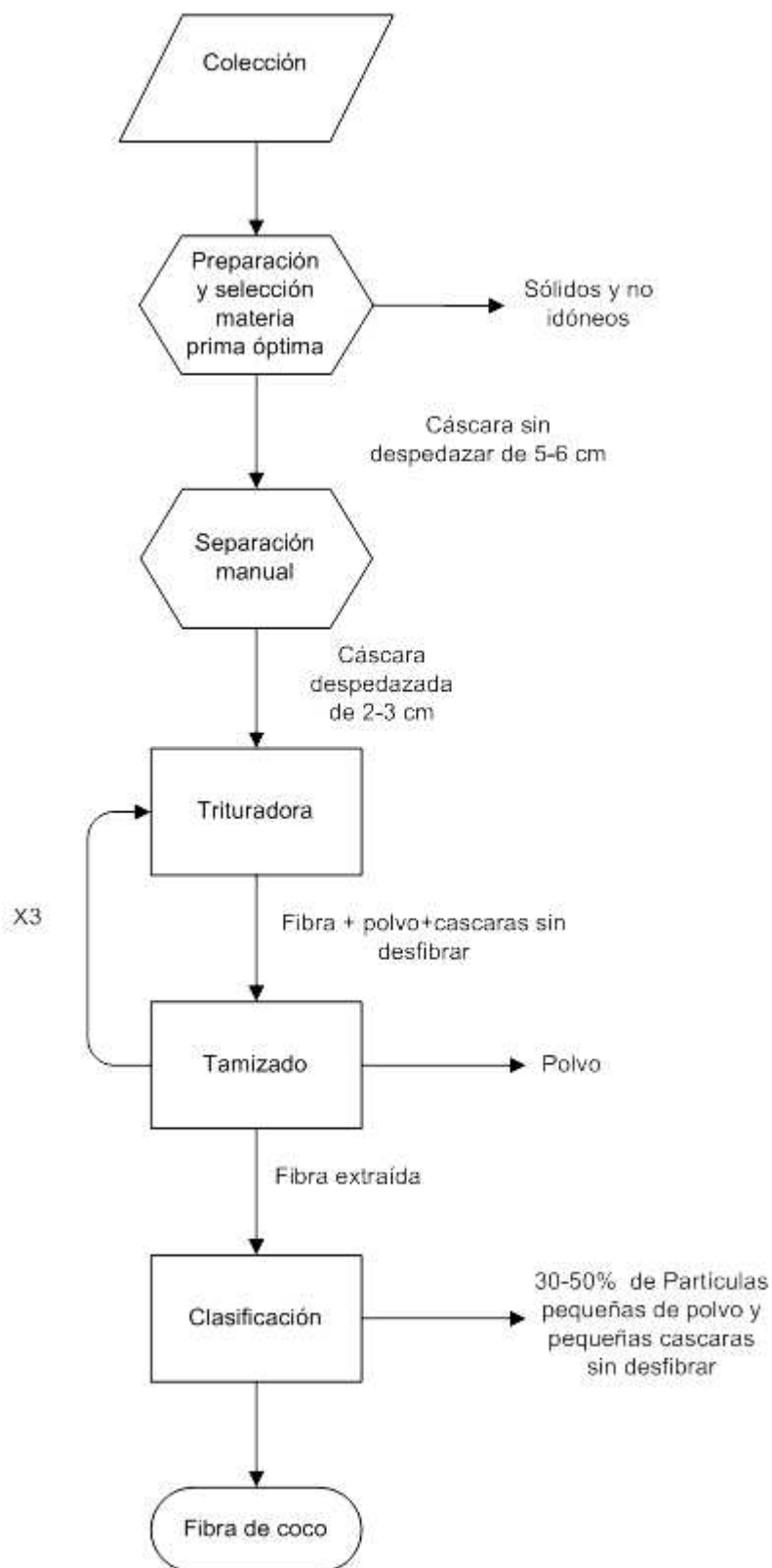


Figura 3.36. Diagrama del proceso de extracción con la trituradora. [27]



- **Separación manual previa**

Se redujo el ancho de las cáscaras que ingresan a la trituradora hasta alrededor de 2 a 3 cm, para facilitar la extracción de la fibra y operación del equipo como se indica en la Figura 3.37



Figura 3.37. Comparación de los anchos de cáscara que ingresa a la trituradora, parte superior cáscaras de 5-6 cm, parte inferior cáscaras de 2-3cm. [27]

- **Ingreso de la fibra a la trituradora**

Para la extracción, se colocó la malla en la trituradora y se introdujeron las cáscaras como se muestra en la Figura 3.38.



Figura 3.38. Preparación del equipo.

- **Tamizado**

A la salida de la trituración se separó el polvo de la fibra con un tamiz como se indica en la Figura 3.39. La fibra tamizada se reingresó a la trituradora hasta que el desprendimiento de polvo ya no fue considerable.



Figura 3.39. Tamizado de las fibras a la salida de la trituradora.

- **Clasificación y selección de la fibra**

Finalmente, la fibra obtenida presentó una gran cantidad de partículas pequeñas de polvo y sólidos de cáscara sin desfibrar, por lo que se realizó una última selección de la fibra para asegurar que sea la idónea para los ensayos como se observa en la Figura 3.40.



Figura 3.40. Selección de la fibra idónea a emplear en los ensayos.

Se puede observar claramente en ambas fibras, tanto de coco como de abacá, el trabajo exhaustivo que conlleva el procesamiento. Además del arduo trabajo, se debe tomar en cuenta todo el tiempo que conlleva la preparación, así como también la energía utilizada en fibra corta y tejida, lo que se traduce en costo de producción. De esta manera, se puede palpar la importancia de trabajar con fibra de cabuya, ya que al ser un producto altamente utilizado a nivel artesanal se encuentra presente en el mercado local como fibra ya procesada en hilo y tejido. Por consiguiente, la elaboración del producto final es mucho más sencilla permitiendo el ahorro de gran cantidad de tiempo, energía y mano de obra.

### 3.4. DISCUSIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

En este apartado se realiza un análisis del proceso de fabricación del material compuesto, enfatizando los puntos fuertes y débiles de la matriz y el refuerzo. La matriz es un polímero termostable de resina poliéster, y la fibra es un producto natural de amplia distribución en el mercado local, debido a que es utilizada artesanalmente. En la Tabla 3.11 se muestra un resumen de las ventajas y desventajas del proceso de fabricación del compuesto.

Tabla 3.11. Resumen de ventajas y desventajas del proceso de fabricación.

Ventajas	Desventajas
Gelificación y solidificación del compuesto sin adición de temperatura	Se requieren grandes presiones para asegurar mínima cantidad de poros
Curado a bajas temperaturas (ambiente o 40°C)	Se debe mantener la presión durante la gelificación y solidificación
No se requieren procesos previos al refuerzo	Se debe asegurar la correcta mojabilidad del refuerzo
Fácil estratificación	

El término termoestable supone que el calor es necesario para el endurecimiento permanente del polímero. Sin embargo, muchos de estos polímeros pueden ser endurecidos a temperatura ambiente solamente por la reacción química llamada reticulación. El curado es un proceso en el cual el material alcanza todas sus propiedades mecánicas, el cual puede ser realizado a una temperatura relativamente baja de 40°C o en su defecto a temperatura ambiente aunque se requiere de un mayor tiempo. Esto es una ventaja ya que en ningún momento de la fabricación se requiere de la adición de calor para obtener altas temperaturas de moldeo que puede afectar o degradar tanto la matriz como las fibras naturales, esto conlleva a un abaratamiento de costos. Por otro lado, el refuerzo es una fibra natural de gran comercialización en el Ecuador, en el mercado local se pueden encontrar gran variedad de hilos y tejidos en tamaños y colores, por lo que no se necesita un proceso previo de hilado o tejidos. De esta manera, se consigue

disminuir enormemente la facilidad de fabricación del compuesto y además, al ser una fibra de gran uniformidad y consistencia simplifica la estratificación.

### 3.5. DISCUSIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL COMPUESTO

En este apartado se realiza un análisis del proceso de fabricación del material compuesto, enfatizando los puntos fuertes y débiles de la matriz y el refuerzo. La matriz es un polímero termostable de resina poliéster, y la fibra es un producto natural de amplia distribución en el mercado local, debido a que es utilizada artesanalmente. En la Tabla 3.12 se muestra un resumen de las ventajas y desventajas del material compuesto.

Tabla 3.12. Resumen de ventajas y desventajas del proceso del compuesto.

Ventajas	Desventajas
Gran facilidad de procesado	La matriz termoestable no se funde al calentarla
Con el uso de tejidos se alcanza mayor comportamiento isotrópico	
Elevada estética	Se alcanzan bajas propiedades mecánicas

La matriz del compuesto es un termoestable, su propiedad más característica es su respuesta al calor, ya que no se funden al calentarlas pero pierden su rigidez a la temperatura de distorsión térmica, que define un límite superior efectivo para su uso en componentes estructurales. Esta característica es una desventaja puesto que los polímeros termoestables no pueden ser reciclados y reutilizados, debido a que han sufrido modificaciones en su estructura química y a nivel molecular. Otra desventaja se tiene al compararlo con otros compuestos como los híbridos con fibra de vidrio o los de matriz diferente, ya que las propiedades mecánicas alcanzadas son menores a tanto a tracción, flexión y sobre todo a impacto.

Por otra parte, existen varias características importantes del compuesto que deben ser destacadas, ya que representan ventajas en comparación con trabajos realizados anteriormente. Entre éstas se encuentra la facilidad de fabricación del material, debido a que el hilo y el tejido están disponibles en el mercado local y no

se necesita de un procesamiento para introducirlos como refuerzo, a diferencia de otras fibras como la de coco y la de abacá. Otra característica importante es la gran estética del refuerzo, puesto que la fibra comercializada ofrece gran variedad de hilos y tejidos en cuanto a colores y tamaños. La uniformidad y consistencia de los tejidos es elevada, por lo que puede ser orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  por separado o en un mismo compuesto como tejido alternado. Este hecho resulta de gran importancia para conseguir resistencia mecánica en varias direcciones, presentando similitud a un material isotrópico. Por ende, la fibra de cabuya y en general el compuesto será de gran utilidad dentro de la industria.

### **3.6. DISCUSIÓN SOBRE EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO**

#### **Ensayos preliminares**

Debido a que existe una gran diferencia entre la fabricación de un tablero de grandes dimensiones y las probetas normalizadas en cuanto a la aplicación de presión, se requieren ensayos preliminares para obtener la máxima fracción volumétrica. Tomando en cuenta que el prototipo se debe realizar con la mejor configuración, el refuerzo es tejido alternado. Al ser alternado se debe introducir un número impar de capas de tejido para asegurar la simetría del compuesto. Por esta razón se elaboraron planchas con 3, 5 y 7 capas, de las cuales resultaron espesores de 3, 5 y 7 mm. Con estas dimensiones y la cantidad de fibra añadida, la fracción volumétrica para todos los casos fue de 0,17; muy inferior a las alcanzadas en la elaboración de probetas. Este análisis fue realizado en el apartado 2.6.7. y se puede observar en la Tabla 2.42.

El tercer compuesto, al tener un mayor espesor ofrece mayor resistencia y estabilidad en la construcción del prototipo, pero al mismo tiempo eleva el peso del producto y el costo ya que se necesita más cantidad de fibra como refuerzo, la cual posee un alto costo, y al mismo tiempo requiere mayor cantidad de elementos. Por esta razón, desde el punto de vista económico, se presentan como mejor opción los compuestos de 3 y 5 mm para alcanzar mayor competitividad en el

mercado. En la Figura 3.41 se presentan las diferentes láminas de compuesto realizadas.

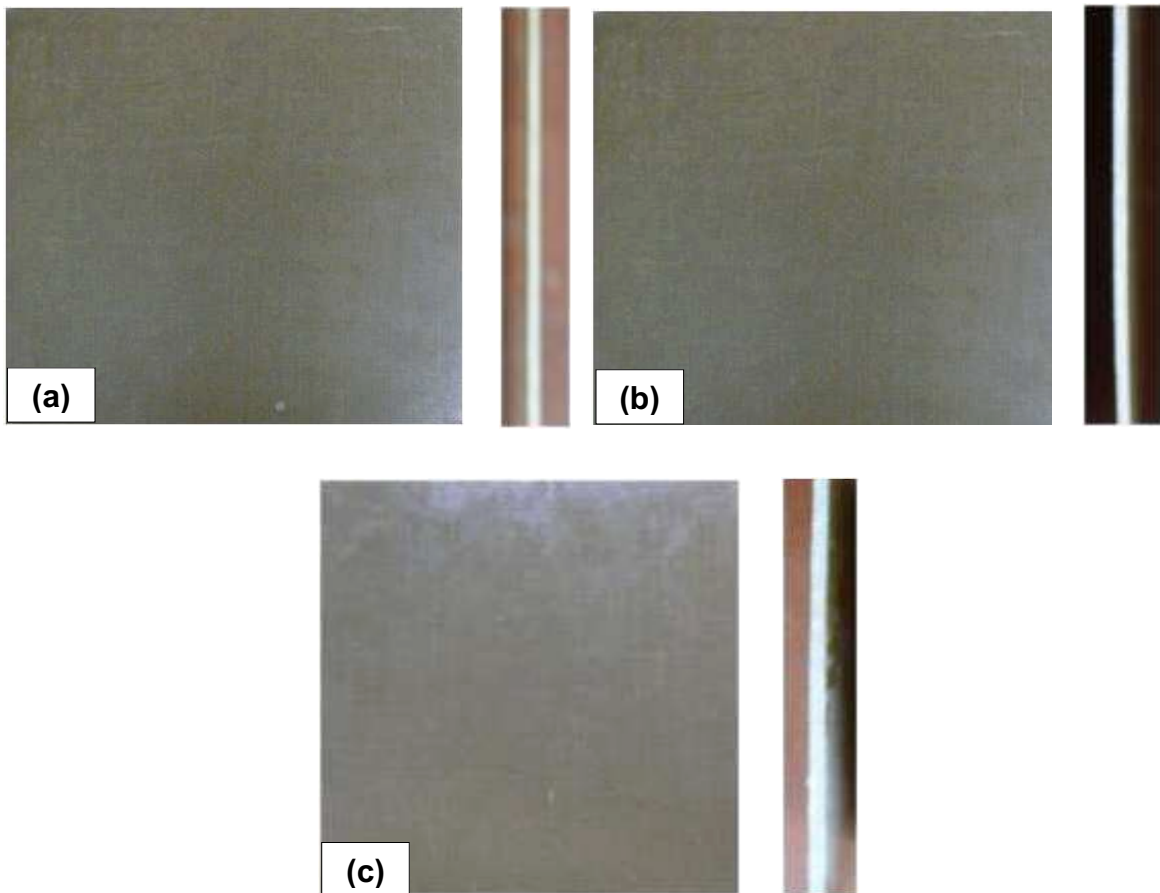


Figura 3.41. Láminas de compuesto: (a) 3 mm; (b) 5 mm; (c) 7 mm.

En la figura anterior se puede observar que se logran un buen acabado superficial en todas las láminas con mínima presencia de discontinuidades, a pesar de la baja presión de moldeo. Además, el espesor es bastante uniforme a lo largo de la plancha.

### **Estimación de costos**

En el apartado 2.7 se realiza una estimación de costos exhaustiva tomando en cuenta varios factores como son: molde, materia prima, servicios básicos y mano de obra. De esta estimación se obtienen los costos finales que se observan en la Tabla 3.13. Estos costos se han obtenido en base al espesor del compuesto para 3 y 5 mm.

Tabla 3.13. Costo final de prototipos.

<b>Prototipo</b>	<b>Costo total (\$)</b>
3 mm de espesor	52,01
5 mm de espesor	59,80

El costo final de fabricación es de \$ 52,01 para el prototipo de 3 mm de espesor y \$ 59,80 para el de 5 mm. De esta manera, se puede apreciar que la diferencia de costos es de apenas \$ 7,79 por lo que no se justifica la carencia de estabilidad al elaborar un producto más delgado. En conclusión, el producto debe ser elaborado con un tablero de espesor de 5 mm. Debido a que no se han encontrado locales de venta del presente producto, no se puede comparar valores finales de venta al público. Por tal motivo, se preguntó costos de fabricación del mismo diseño pero en madera en diferentes carpinterías de la ciudad. El valor promedio fue de \$ 90,00 al producto terminado. De esta manera, comparado con este valor promedio se consigue una reducción de costo del 33,56% para el mostrador de 5 mm de espesor.

### **Proceso de elaboración**

La elaboración del prototipo se realiza a partir de una lámina de compuesto de 5 mm de espesor como fue definido anteriormente. Esta lámina consta de 5 capas de tejido dispuesto alternadamente, con lo cual se pudo deducir que la estratificación sería sencilla. El procedimiento de fabricación es muy similar al de las probetas normalizadas con la diferencia de la aplicación de presión, ya que al ser un molde de grandes dimensiones (71x71cm) no se puede utilizar la prensa hidráulica. Por este motivo, se utilizó un bloque de cemento cuyo peso es de 250 kg. De esta manera se logró alcanzar una presión distribuida sobre la lámina de compuesto de 1,6 psi, mucho menor a 1000 psi utilizados en la producción de probetas. En la Figura 3.42 se puede apreciar el diagrama de flujo de elaboración del prototipo.

# Tarea	Tarea	Operación				Tiempo	Notas
		Operación	Transporte	Inspección	Almacenamiento		
1	Almacenamiento de resina y fibras	○	↑	□	▽	-	
2	Preparación de molde y fibra	○	↑	□	▽	15 min	Depende del ensayo
3	Preparación de mezcla para matriz	○	↑	□	▽	8 - 10 min	
4	Fabricación de tableros de compuesto	○	↑	□	▽	100 - 105 min	Por cada tablero
5	Inspección del acabado	○	↑	□	▽	1 min	
6	Curado del material	○	↑	□	▽	16 horas	A 40°C
7	Elaboración de separadores de madera	○	↑	□	▽	20 min	Por cada separador
8	Corte y taladrado de tableros	○	↑	□	▽	120 min	
9	Armado de prototipo	○	↑	□	▽	30 min	
10	Inspección del prototipo	○	↑	□	▽	1 min	
11	Almacenamiento del producto	○	↑	□	▽	-	

Figura 3.42. Diagrama de flujo de elaboración del prototipo.



Una vez que la lámina de compuesto ha sido elaborada se deben realizar varios maquinados de corte y taladrado con el fin de alcanzar las dimensiones finales del diseño y los agujeros para el producto almacenado y los respectivos ensambles. Cabe mencionar que estas operaciones son realizadas con el compuesto ya curado, es decir, cuando ha desarrollado todas sus propiedades mecánicas. El corte se realizó con sierra y caladora, y el taladrado con un taladro manual. Previamente se realizaron pruebas como se observa a continuación.

### Pruebas de corte

Estas pruebas se realizaron para observar el comportamiento del material frente al corte y la factibilidad de utilizar herramientas comunes como los son la sierra manual y la mesa de corte con sierra circular. Como resultado se encontró que material presente gran facilidad al corte sin desgaste de la herramienta. El compuesto no ofrece gran resistencia al corte, sin embargo, la velocidad de avance debe ser baja, puesto que se evidencia calentamiento tanto en la pieza como en herramienta. Las pruebas de corte se pueden observar en la Figura 3.43.

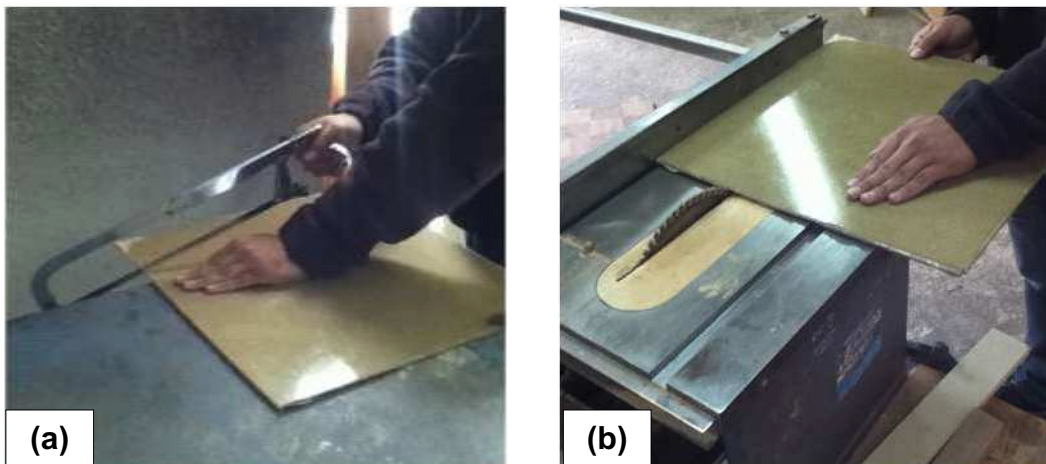


Figura 3.43. Pruebas de corte: (a) corte con sierra manual; (b) corte en mesa con sierra circular.

### Prueba de taladrado

Esta prueba se realizó con un taladro manual con la finalidad de conocer la facilidad de corte de la broca. Los parámetros más importantes dentro del proceso de taladrado son avance y velocidad de corte. Un taladro manual cuenta con una velocidad de corte de 2800 rpm suficiente para agujerear el material en estudio. La velocidad de avance en cambio, es controlada por el operador. Esta velocidad debe ser reducida para evitar un exceso de calentamiento en el material y la herramienta. La prueba de taladrado se puede observar en la Figura 3.44.



Figura 3.44. Prueba de taladrado.

Finalmente, se debe mencionar que las pruebas de mecanizado desarrolladas en este apartado no deben considerarse como clara referencia para fines industriales, ya que no se han considerado varios factores como: (i) presencia de delaminaciones, (ii) temperatura de calentamiento durante el corte que puede producir distorsión o degradación, y (iii) exposición de pequeñas porciones de fibra al ambiente que pueden degenerar el compuesto con la absorción de humedad.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- La fibra de cabuya es un elemento natural muy abundante en el mercado local, ya que crece en forma silvestre o cultivada en los valles y laderas de los Andes, lo cual facilita su obtención y procesamiento para adquirirlo en el mercado local ya sea como hilo o tejido y ser utilizado como refuerzo en un material compuesto.
- La importancia de trabajar con fibra de cabuya radica en el hecho que, al ser un producto altamente utilizado a nivel artesanal se encuentra presente en el mercado local como fibra ya procesada en hilo y tejido, al contrario de otras fibras naturales como la de coco y abacá. Por consiguiente, la elaboración del producto final es mucho más sencilla permitiendo el ahorro de gran cantidad de tiempo, energía y mano de obra.
- Para la elaboración del material compuesto se utilizó una presión de moldeo de 1.000 psi con la cual se evitó la presencia de burbujas dentro del material. El tiempo de solidificación se encuentra entre 60 y 120 minutos dependiendo del espesor del compuesto, cantidad de iniciador con un 0,5% de octoato de cobalto y acelerante con un 1% de MEKP dentro de la mezcla.
- Las fracciones volumétricas máximas aceptables para la formulación de materiales compuestos de cabuya-poliéster desde el punto de vista de la mojabilidad de la fibra con la matriz y tolerancia en el dimensionamiento normalizado, fueron de 0,34 para las probetas de ensayos de tracción, 0,30 para las probetas de ensayos a flexión y 0,26 para las probetas de ensayos de impacto.

- Al incrementar la fracción volumétrica de refuerzo, es decir, la cantidad de fibra dentro de la matriz, se obtienen mejores propiedades del material compuesto. Esto puede explicarse debido a que al existir la adecuada cantidad de refuerzo, las fibras absorben parte de la carga, minimizando el efecto que la fuerza aplicada tendría en la matriz.
- Al comparar el material compuesto en estudio frente a otros compuestos, existe una gran diferencia en las propiedades mecánicas, resultando ser inferiores tanto a tracción, flexión y sobre todo a impacto. Sin embargo, se debe destacar la facilidad de fabricación, debido a que el hilo y el tejido están disponibles en el mercado local y no se necesita de un procesamiento para introducirlos como refuerzo.
- Otra característica importante es la gran estética del refuerzo, puesto que la fibra comercializada ofrece gran variedad de hilos y tejidos en cuanto a colores y tamaños. La uniformidad y consistencia de los tejidos es elevada, por lo que puede ser orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  por separado o en un mismo compuesto como tejido alternado. Este hecho resulta de gran importancia para conseguir resistencia mecánica en varias direcciones, resultando en un material cuasi-isotrópico.

## ENSAYOS DE TRACCIÓN

- Al comparar los diferentes refuerzos de hilo y tejido orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto al poliéster, se tiene un aumento del esfuerzo máximo a tracción y rigidez en todas las configuraciones. El compuesto reforzado con fibra longitudinal, con fracción volumétrica de 0,39; con estireno y quince días de curado (L.E.15d.39%) fue el que presentó la mayor resistencia a la tracción con un valor de 74,32 MPa, lo cual constituyó un incremento del 159,26% con respecto a la resina poliéster. Por otro lado, el material reforzado con tejido orientado a  $0^\circ$ , con fracción volumétrica de 0,34; con estireno y quince días de curado (T $0^\circ$ .E.15d.34%) ofreció la mayor rigidez

con 5305,3 MPa, esto representó un aumento del 255,48%. Estos resultados se obtuvieron sin considerar todavía los efectos de los diferentes curados y la presencia de estireno dentro de la matriz de poliéster.

- Al trabajar con un refuerzo alternado las propiedades resultantes son intermedias entre las orientaciones base de 0° y 45°, pero más cercanas a la primera que presenta valores más elevados. Esto se debe a que esta configuración posee 5 capas de tejido como refuerzo, lo que resulta en un material simétrico con dos capas de tejido orientado a 45° y tres capas orientadas a 0°. Lo interesante de la configuración alternada es que se resulta es un material cuasi-isotrópico.
- Al desarrollar el curado del material con temperatura de 40°C, no se aprecian diferencias estadísticamente significativas si se realiza durante 16 y 24 horas, por lo que se prefirió trabajar con el primero ya que se utilizan menos recursos de tiempo y energía. Ahora, si se compara este material con respecto a la probeta de curado de 15 días se puede alcanzar el mismo valor de esfuerzo máximo a la tracción e incrementar la rigidez del material en más del 25%.
- Los ensayos realizados a probetas sin estireno como elemento constitutivo de la matriz sugieren que es beneficioso prescindir de este componente, ya que se obtienen las mismas propiedades e inclusive se consiguen pequeños incrementos de esfuerzo máximo y rigidez.
- El nuevo material A.16h.34% (alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40 °C y fracción volumétrica de 0,34) es el que presentó las mejores propiedades a tracción con un valor de esfuerzo máximo de 60,63 MPa, con lo que se obtuvo un incremento del 111,51% y un módulo de elasticidad de 6508,18 MPa con un incremento del 336,08% respecto al poliéster.

## ENSAYOS DE FLEXIÓN

- Al comparar los diferentes refuerzos de hilo y tejido orientado a  $0^\circ$  y  $45^\circ$  se tiene que el esfuerzo máximo a la flexión a tres puntos descendió para los materiales compuestos elaborados con la menor fracción volumétrica en cada configuración de refuerzo con respecto al de la matriz de resina poliéster. El descenso de esta propiedad mecánica para el refuerzo continuo longitudinal fue del 9,24%, para el tejido a  $45^\circ$  fue del 6,89% y para el tejido a  $0^\circ$  fue del 7,05%. Estos resultados podrían explicarse al considerar los problemas que presentarían estos compuestos en cuanto a la pobre distribución del refuerzo en el matriz al haber una baja cantidad de fibra.
- Por otro lado, las probetas con mayor fracción volumétrica presentan un incremento en el esfuerzo máximo a flexión con relación al poliéster. Este incremento fue de 9,13% para el refuerzo continuo longitudinal, 22,59% para el tejido a  $45^\circ$  y 16,56% para el tejido a  $0^\circ$ . Esto podría explicarse debido a que al existir mayor cantidad de refuerzo, las fibras absorberían parte de la carga, minimizando el efecto que la fuerza aplicada tendría en la matriz pura.
- Todas las probetas reforzadas con fibra presentaron un incremento en la rigidez, siendo las de mayor fracción volumétrica las que ofrecen mayor incremento con relación al poliéster. El aumento de esta propiedad mecánica para el refuerzo continuo longitudinal fue del 58,12%, para el tejido a  $45^\circ$  fue del 67,75% y para el tejido a  $0^\circ$  fue del 98,29%.
- Dado que el número de capas para cumplir con el requerimiento de 0,30 de fracción volumétrica es ocho, la probeta no es completamente simétrica ya que posee cuatro capas de tejido orientadas a  $0^\circ$  y cuatro orientadas a  $45^\circ$ . Por tal motivo se tiene que los resultados del nuevo material alternado no son intermedios entre las orientaciones base de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ , sino que inclusive presenta valores mayores de esfuerzo máximo a la flexión y rigidez.

- Al realizar el curado del material con temperatura de 40°C, no se aprecian diferencias estadísticamente significativas si se efectúa durante 16 o 24 horas. Por este motivo se prefirió trabajar con el menor tiempo, debido a la menor utilización de recursos. Ahora, si se compara este material con el de curado de 15 días se puede alcanzar el mismo valor de esfuerzo máximo a la tracción e incrementar la rigidez del material en más del 14%.
- Los ensayos realizados a probetas de flexión sin estireno como elemento constitutivo de la matriz sugieren que es beneficioso prescindir de este componente, ya que se obtienen las mismas propiedades e inclusive se consigue pequeños incrementos de esfuerzo máximo y rigidez. Además, esto también conlleva a agilizar el procesado del material y a abaratar costos, puesto que se reduce un elemento de la matriz.
- El nuevo material A.16h.30% (alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40°C y fracción volumétrica de 0,30) presentó las mejores propiedades a flexión con un valor de esfuerzo máximo de 76,29 MPa, con lo cual se obtuvo un incremento del 34,8% y un valor de módulo de elasticidad de 4434,10 MPa, el cual representó un incremento de 137,4% con respecto a la resina poliéster.

## **ENSAYOS DE IMPACTO**

- Una vez obtenidos los resultados de tracción y flexión, se pudo observar que el material alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40°C (A.16h) presentó la mejor combinación de propiedades mecánicas, ya que proporcionó incrementos significantes en esfuerzo máximo a tracción y flexión, así como también un gran aumento en la rigidez, tomando en cuenta su configuración cuasi-isotrópica. Por estas razones, se decidió elaborar las probetas para ensayo de impacto con esta configuración. La fracción volumétrica de refuerzo alcanzada luego de varios ensayos preliminares resultó de 0,26.

- De los ensayos de impacto se pudo determinar que el material A.16h.26% (alternado sin estireno con curado de 16 horas a 40°C y fracción volumétrica de 0,26) absorbió una energía de 0,15 J que corresponde a un incremento del 114,3% con respecto al poliéster.

## **PROTOTIPO**

- El prototipo fue construido con un tablero de 5 mm de espesor, ya que éste es el que ofrece la mejor combinación de costo y estabilidad. Este tablero consta con 5 capas de tejido colocado alternadamente, con lo cuál se alcanzó una fracción volumétrica de refuerzo de 0,17.
- El producto elaborado fue un mostrador de vinos, que posee una capacidad de 5 unidades con la posibilidad de apilarse para el almacenamiento de un mayor número de botellas. Además, los orificios para el pico y la base de las botellas están dispuestos de tal forma que ofrecen una inclinación de 8,5° para asegurar el contacto entre el líquido y el corcho, en cualquiera de las dos posiciones de funcionamiento horizontal y vertical, con lo cual se evita la oxidación y mal sabor del vino.
- El costo total de fabricación del producto es de 59,80 dólares americanos, con lo cual se consigue una disminución del 35,56% respecto al costo que se obtiene en el mercado de un mostrador similar elaborado en madera.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

- Impulsar la generación de más aplicaciones utilizando los resultados alcanzados en el presente estudio.
- Buscar nuevos y más eficientes métodos de procesamiento con la finalidad de aprovechar los resultados obtenidos y disminuir el costo de los productos que elaborados.



- Se recomienda realizar un tratamiento especial que modifique la superficie de las fibras para lograr una óptima adhesión con la matriz polimérica y de esta manera, mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto. Estos tratamientos pueden ser físicos (tratamiento plasma de baja temperatura, tratamiento de corona, mercerización y tratamiento térmico) o químicos (acetilación, benzilación, propinilación, y tratamientos con estearatos).
- Del análisis de resultados se obtuvo que la fibra de vidrio como componente de un refuerzo híbrido conjuntamente con las fibras naturales, permite incrementar las propiedades mecánicas del compuesto, especialmente la energía de falla al impacto. Por lo tanto, se recomienda utilizar un refuerzo híbrido de fibra de vidrio y fibra de cabuya dentro de la matriz de poliéster.
- De la comparación con otros compuestos se obtuvo que entre todas las configuraciones desarrolladas en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN (LANUM), la que presenta las mejores propiedades es el compuesto con matriz de ácido poliláctico (PLA) y fibra longitudinal de abacá. Debido a esto, sería recomendable investigar el uso de esta matriz para ser reforzada con fibra continua de cabuya orientada longitudinalmente y con tejidos en una sola dirección y alternados. Se conseguiría la ventaja de un compuesto totalmente verde, al ser el PLA un material biodegradable.
- Buscar convenios con la distribuidora de fibra de cabuya para, de esta manera adquirir el tejido a un precio más económico y abaratar costos de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SIMBAÑA A., PABÓN G.; Fibras Naturales de la provincia de Imbabura; Ibarra; Ecuador; 2006.
- [2] KOZLOWSKI. R.; New trends in the utilization of by-products of fiber crops residue in pulp and paper industry, building engineering, automotive industry and interior furnishing.504; 2000.
- [3] JURADO S. Y SARZOSA X.; Estudio de la cadena agroindustrial, de la cabuya en la producción de miel y licor de cabuya; 2009.
- [4] PAEZ M.; Obtención de Pulpa y Papel de Cabuya; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico EPN; 1994.
- [5] CICO (Centro de Información e inteligencia Comercial); Perfiles de Mercado; Perfiles de las demás Cuerdas y Cordajes del Género Agave; Noviembre 2009.
- [6] ECOFIBRAS.; Proyecto agroindustrial para producción de telas burdas, 100% ecológicas, cambiando los tintes químicos por tintes vegetales en la empresa cooperativa de fibras naturales [en línea] en: <http://www.infoagro.net/shared/docs/a5/Cfibras4.pdf>.
- [7] LEVY F.; Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia; Primera edición; Sao Paulo, Brasil; Edgard Blücher; 2006.
- [8] PAEZ J.; Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Quito; Ecuador; Tesis EPN; 2007.
- [9] SIMBAÑA. A. Y MERA. M.; Ensayo de Materiales Compuestos en la elaboración de tableros mixtos para el aprovechamiento de residuos agroindustriales; 2009.

- [10] MOHANTY, A., MISRA, M., DRZAL, L.; Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites; Taylor & Francis Group; 2005
- [11] SANJAY K., MAZUMDAR; Composites Manufacturing: materials, product and process engineering; 2002.
- [12] CONTRERAS María, HORMAZA Wilson, MARAÑÓN A.; Fractografía de la fibra natural extraída de la cabuya y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de cabuya y matriz resina poliéster; Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales; Venezuela; 2009.
- [13] VILLACÍS H.; Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico EPN; 2011.
- [14] BELTRÁN M., MARCILLA A.; Tecnología de Polímeros [en línea] en: <http://iq.ua.es/TPO/Tema6.pdf>
- [15] BAILLIE C.; Green Composites. Polymer Composites and the Environment; Estados Unidos; Woodhead Publishing Limited; 2004.
- [16][http://www.fao.org/es/esc/common/ecq/343/es/esc\\_4\\_sp.pdf](http://www.fao.org/es/esc/common/ecq/343/es/esc_4_sp.pdf)
- [17][http://www.decolombia.biz/sitio\\_principal/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=1&id=20&Itemid=35](http://www.decolombia.biz/sitio_principal/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=1&id=20&Itemid=35)
- [18]<http://www.quisqueyavirtual.edu.do/wiki/Cabuya>
- [19]<http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/abaca.html>
- [20]<http://pdfcast.org/pdf/materiales-compuestos-reforzados-con-fibra-de-abaca>
- [21][http://www.jute.org/plant\\_1.htm](http://www.jute.org/plant_1.htm)
- [22]<http://www.topseis.com/Doc/poliester.pdf>

- [23]<http://es.scribd.com/doc/27972522/-INTRODUCCION-A-LOS-USOSDE-LA-RESINA-POLIESTER-Y-OTROS-MATERIALES-1>
- [24][http://www.vinos-y-mas-vino.com/la\\_conservacion/el\\_vino\\_en\\_casa.htm](http://www.vinos-y-mas-vino.com/la_conservacion/el_vino_en_casa.htm)
- [25] GUERRERO, V.; Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Escuela Politécnica Nacional; Imprefepp.
- [26] CHAND, N.; FAHIM, M.; Tribology of natural fiber polymer composites; Woodhead publishing limited; Cambridge; England; 2005.
- [27] DELGADO, F.; Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y fibra de vidrio para la elaboración de tableros; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Químico EPN; 2012.
- [28] SALAS, A.; Obtención de compuestos de polietileno reforzados con fibra de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; EPN; 2009.
- [29] MOSCOSO, J.; Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibra de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; EPN; 2007.
- [30] CEVALLOS, J.; TENESACA G.; Obtención y caracterización de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzada con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; EPN; 2012.
- [31] PONCE, D.; Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural; Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; EPN; 2011.
- [32] BIRON, M.; Thermosets and Composites: Technical information for plastics users; December 2003.

- [33] PICKERING, K.; Properties and performance of natural-fiber composites.
- [34] CHAND, N.; FAHIM, M.; Tribology of natural fiber composites; Woodhead Publishing; Cambridge; England.
- [35] JAMAL, Y. Sheikh-Ahmad; Machining of polymer composites; The Petroleum Institute; Department of Mechanical Engineering; Abu Dhabi; United Arab Emirates.

## ANEXOS

<b><u>ANEXOS</u></b> .....	<b>2099</b>
<b><u>ANEXO 1.</u></b> <b><u>ENSAYO DE TEJIDO DE CABUYA</u></b> .....	<b>210</b>
<b><u>ANEXO 2.</u></b> <b><u>CUADRO DE DATOS DE ENSAYO DE IMPACTO</u></b> .....	<b>212</b>
<b><u>ANEXO 3.</u></b> <b><u>MÉTODO DE ANÁLISIS COMPARATIVO ANOVA</u></b> .....	<b>213</b>
<b><u>A3.1.</u></b> <b><u>ENSAYO DE TRACCIÓN</u></b> .....	<b>214</b>
<b><u>A3.2.</u></b> <b><u>ENSAYO DE FLEXIÓN</u></b> .....	<b>227</b>
<b><u>A3.3.</u></b> <b><u>ENSAYO DE IMPACTO</u></b> .....	<b>241</b>
<b><u>ANEXO 4.</u></b> <b><u>PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS</u></b> .....	<b>242</b>
<b><u>ANEXO 5.</u></b> <b><u>FICHA TÉCNICA RESINA POLIÉSTER ANDERPOL 859</u></b> .....	<b>245</b>
<b><u>ANEXO 6.</u></b> <b><u>PLANOS DEL PROTOTIPO</u></b> .....	<b>246</b>

## ANEXO 1. ENSAYO DE TEJIDO DE CABUYA



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO**



**INFORME No. CTP-IT-2011-09-93**

**Página 1 de 2**

**EMPRESA SOLICITANTE**

SR. NAPOLEÓN ANDRÉS TAMAYO DUQUE  
 FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA – E.P.N.

**MATERIAL QUE ENTREGA**

Una muestra de tejido artesanal.

**FECHA DE RECEPCION DEL MATERIAL:** 2011 / 08 / 09

**FECHA DE ENTREGA:** 2011 / 09 / 20

**TRABAJO SOLICITADO**

Determinar: Resistencia a la tracción y elongación a la rotura según norma ASTM D5034.

**COSTO**

	Dólares
Costo análisis	17.86
IVA (12%)	2.14
<b>Total</b>	<b>20.00</b>

**Director del Centro Textil**

**Ing. Omar Bonilla H.**  
**L.P. 17 – 05 – 1024**

Los resultados de este informe conciernen exclusivamente a las muestras, productos o materiales entregados al Centro Textil Politécnico y no puede extenderse a lotes de producción o comprados. La reproducción de este informe solo se autoriza si se hace en su totalidad.

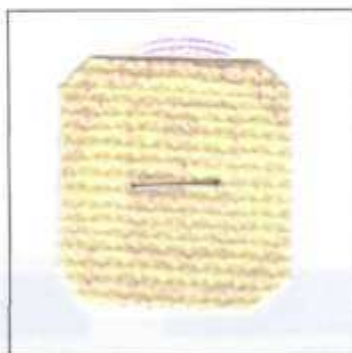


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**CENTRO TEXTIL POLITÉCNICO**



**INFORME No. CTP-IT-2011-09-93**

Página 2 de 2



**Muestra**

**PROPIEDAD DETERMINADA: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN**

**NORMA UTILIZADA: ASTM D5034**

**RESULTADOS:**

Longitudinal		Transversal	
Fuerza de rotura [kgf]	Elongación a la rotura [%]	Fuerza de rotura [kgf]	Elongación a la rotura [%]
33,57	3,0%	31,31	7,6%
33,41	3,3%	27,27	5,9%
29,29	2,4%	26,22	6,8%

<b>Promedio</b>	<b>32,09</b>	<b>2,9%</b>	<b>28,27</b>	<b>6,8%</b>
-----------------	--------------	-------------	--------------	-------------

**Director del Centro Textil**

**Ing. Omar Bonilla H.**  
**L.P. 17 - 05 - 1024**

Los resultados de este informe conciernen exclusivamente a las muestras, productos o materiales entregados al Centro Textil Politécnico y no puede extenderse a lotes de producción o comprados. La reproducción de este informe solo se autoriza si se hace en su totalidad.





### ANEXO 3. MÉTODO DE ANÁLISIS COMPARATIVO ANOVA

Para llevar a cabo el análisis comparativo de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos ensayados, se utilizó el procedimiento estadístico de análisis de varianza (ANOVA), con la ayuda de Excel 2010, y StatgwinPlus 5.1. Para el desarrollo del análisis fue necesario definir el nivel de confianza a considerarse, el mismo que se definió en 95 %, debido a que los parámetros en el moldeo por compresión fueron difíciles de controlar y además las propiedades de la fibra de cabuya utilizadas no fueron constantes ya que dependen de diversos factores como suelo, clima, plantación, edad, plagas y otras.

Para poder utilizar el método ANOVA de comparación de datos se debían cumplir las tres hipótesis en las que se basa este análisis:

- Para cada población, la variable de respuesta está normalmente distribuida.
- La varianza de la variable de respuesta, representada por  $\sigma^2$ , es la misma para todas las poblaciones.
- Las observaciones deben ser independientes.

El objetivo del ANOVA es comprobar la hipótesis nula, la cual afirma las hipótesis mencionadas anteriormente y aquella donde se afirma que las medias de los tratamientos son iguales. Si se rechaza la hipótesis nula significa que todas las medias poblacionales son distintas o que al menos dos medias poblacionales tienen distintos valores. Para afirmar o rechazar la hipótesis nula el ANOVA se efectuó la prueba F que consiste en la relación entre el estimado de la varianza poblacional entre tratamientos y el estimado de la varianza poblacional dentro de tratamientos (MSRT/MSE). El valor de F que provoque el rechazo de la hipótesis nula depende de un valor crítico, el mismo que viene dado por el nivel de significancia. Este nivel de significancia depende a su vez del nivel de confianza del estudio definido anteriormente del 95%.

Para el caso en el cual la hipótesis nula es rechazada, difícilmente se conoce cuales valores son estadísticamente diferentes. Por lo tanto, en esta situación se

recurrió al procedimiento de las diferencias menos significativas (LSD: least-significant difference) de Fisher para determinar donde se encontraban las diferencias.

El valor de LSD se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{t_{\alpha, \nu} \sqrt{MSE}}{\sqrt{n_i n_j}}$$

donde:

$t_{\alpha, \nu}$ : Valor de T en la distribución t de Student, para un nivel de significancia  $\alpha$  y grados de libertad ( $\nu$ ), donde  $\nu$  corresponde al número total de observaciones de los k tratamientos efectuados; MSE: varianza poblacional dentro de tratamientos;  $n_i$ : Número de observaciones del tratamiento i;  $n_j$ : Número de observaciones del tratamiento j.

Si el valor absoluto entre la diferencia de las dos medias estudiadas es mayor al LSD, se dice que las medias son estadísticamente diferentes. Así se procedió a analizar el gráfico de cajas y bigotes de las muestras.

A continuación se presentan las gráficas de medias, cajas y bigotes para los diferentes resultados obtenidos en los ensayos realizados dentro del presente proyecto.

### A3.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

En las figuras siguientes se presentan los diagramas de medias de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación de los ensayos realizados a tracción para las diferentes configuraciones realizadas. Inicialmente se comparan los diferentes refuerzos utilizados que son: hilo orientado longitudinalmente, tejido orientado a 0° y tejido orientado a 45°. Luego se comparan los efectos de intercalar tejidos con diferentes orientaciones obteniéndose un refuerzo alternado, además de probar con diferentes curados y prescindir del estireno como constituyente de la matriz.

Antes de presentar las gráficas se presenta la codificación de las configuraciones de los materiales compuestos ensayados a tracción para la adecuada comprensión de las figuras.

Tabla A3.1. Codificación de probetas a tracción

Codificación	Designación	Significado
1T	L.E.15d.23%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,23
2T	L.E.15d.39%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,39
3T	T45°.E.15d.28%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,28
4T	T45°.E.15d.34%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
5T	T0°.E.15d.28%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,28
6T	T0°.E.15d.34%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
7T	Resina poliéster	Resina poliéster
8T	A.E.15d.34%	Tejido alternado con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
9T	A.E.16h.34%	Tejido alternado con estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,34
10T	A.E.24h.34%	Tejido alternado con estireno, curado por 24 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,34
11T	T0°.15d.34%	Tejido a 0° sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
12T	A.15d.34%	Tejido alternado sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,34
13T	A.16h.34%	Tejido alternado sin estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40°C y fracción volumétrica de 0,34

Una vez definida la codificación de las diferentes configuraciones, se procede con el análisis mediante el método ANOVA de comparación de datos. Las propiedades examinadas fueron: esfuerzo máximo a la tracción, módulo de elasticidad y deformación máxima. Inicialmente se realizó el análisis de los diferentes refuerzos de hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientados a 0° y resina poliéster.

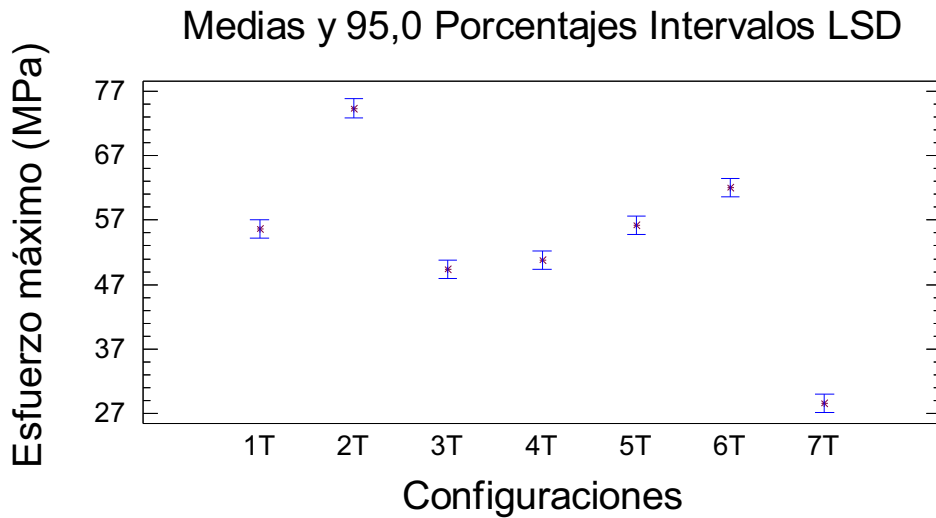


Figura A3.1. Esfuerzo máximo a la tracción de materiales compuestos con hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientado a 0° y resina poliéster.

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones excepto entre 1T (L.E.15d.23%) y 5T (T0°.E.15d.28%); 3T (T45°.E.15d.28%) y 4T (T45°.E.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.1. También se puede observar que todas las configuraciones con refuerzo de cabuya tienen un incremento de esfuerzo máximo con respecto a la resina poliéster siendo la de más alto valor la configuración 1T (L.E.15d.23%).

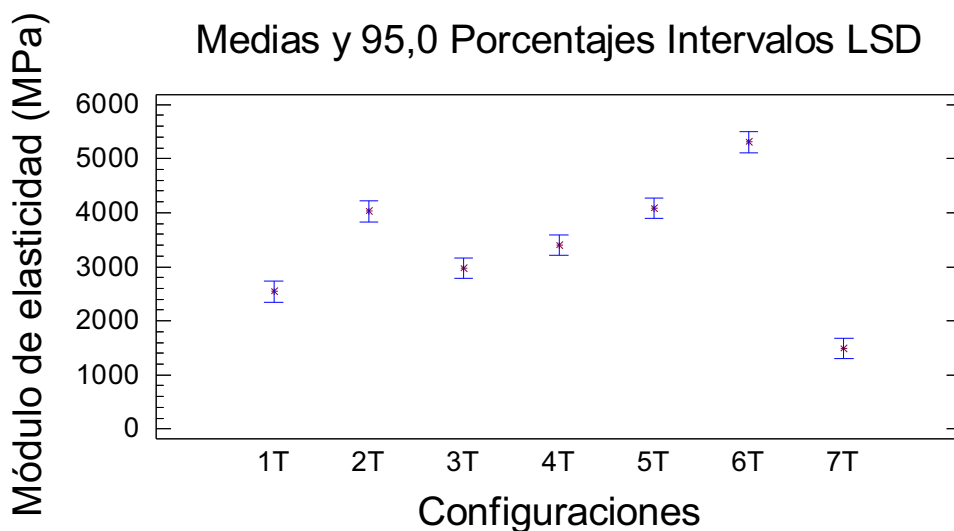


Figura A3.2. Módulo de elasticidad a la tracción de materiales compuestos con hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientado a 0° y resina poliéster.

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de casi todas las configuraciones excepto entre 2T (L.E.15d.39%) y 5T (T0°.E.15d.28%) como se observa en la Figura A3.2. También se puede observar que todas las configuraciones con refuerzo de cabuya tienen un incremento módulo de elasticidad con respecto a la resina poliéster siendo la de mayor valor la configuración 6T (T0°.E.15d.34%).

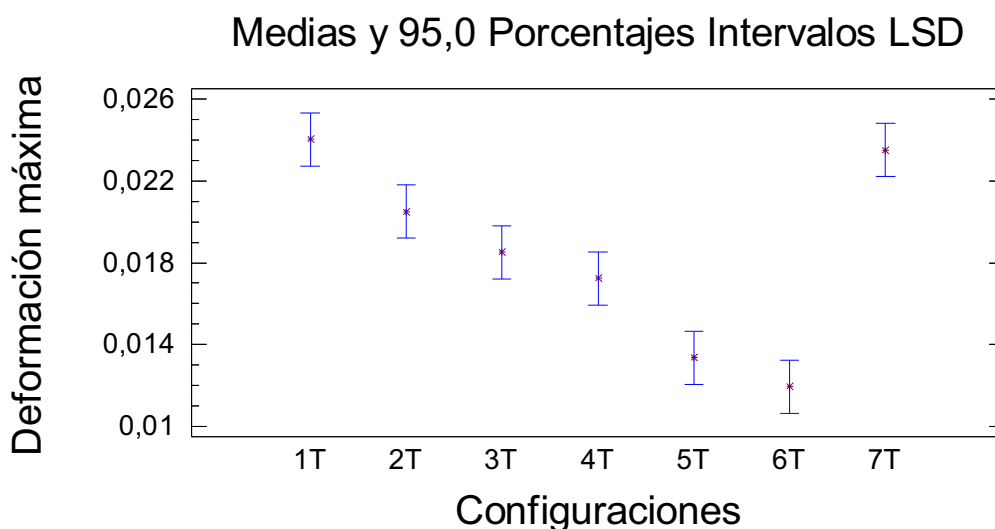


Figura A3.3. Deformación máxima a la tracción de materiales compuestos con hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientado a 0° y resina poliéster.

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de casi todas las configuraciones excepto entre 1T (L.E.15d.23%) y 7T (Resina); 2T (L.E.15d.39%) y 3 (T45°.E.15d.28%); 3 (T45°.E.15d.28%) y 4 (T45°.E.15d.34%); 5T (T0°.E.15d.28%) y 6T (T0°.E.15d.34%) como se observa en la Figura A3.3. También se puede observar que todas las configuraciones con refuerzo de cabuya presentan una menor deformación con respecto a la resina poliéster excepto la configuración 1T (L.E.15d.23%).

En busca de obtener un material con mayor similitud a lo isotrópico, se dispone trabajar con tejido en capas alternadas, es decir una capa orientada a 0° y la siguiente a 45° hasta completar el número de capas precisado para la fracción

volumétrica determinada, que en este caso resulta ser 0,34 ya que ofrece mejores propiedades que la fracción volumétrica de 0,28. Simultáneamente se buscó analizar el efecto variar el curado del material, elaborando diferentes probetas con curado a temperatura ambiente durante 15 días, curado a 40 °C por 16 horas y curado a 40 °C por 24 horas.

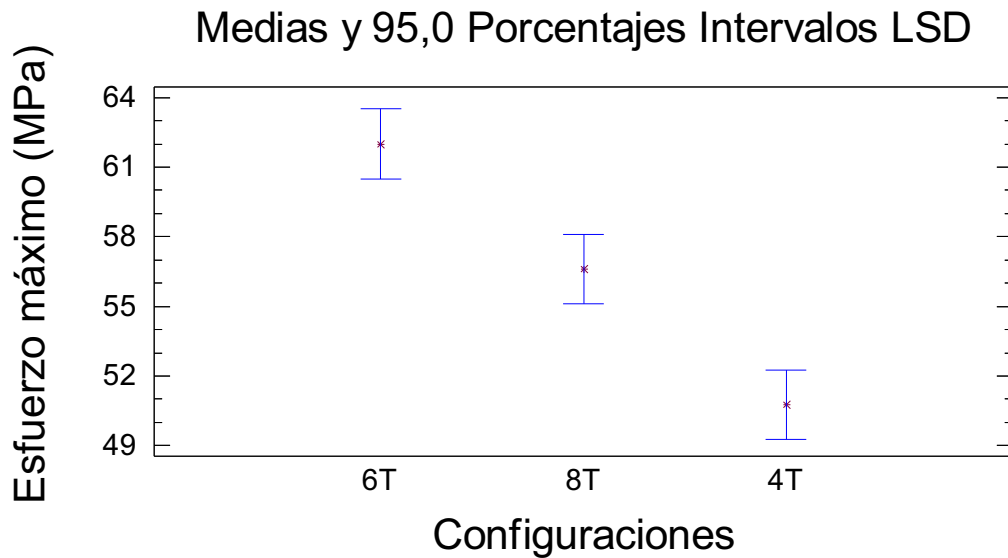


Figura A3.4. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%), 8T (A.E.15d.34%) y 4T (T45°.E.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones como se puede observar en la Figura A3.4. También se puede observar que el esfuerzo máximo a tracción del compuesto con tejido alternado posee un valor intermedio entre sus orientaciones base de 0° y 45°.

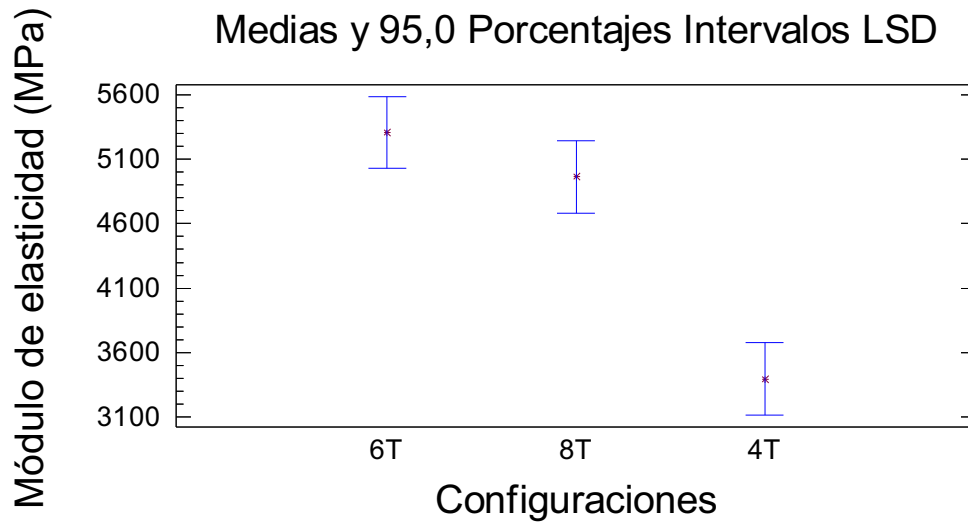


Figura A3.5. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 6T ( $T0^\circ$ .E.15d.34%), 8T (A.E.15d.34%) y 4T ( $T45^\circ$ .E.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 6T ( $T0^\circ$ .E.15d.34%) y 8T (A.E.15d.34%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 4T ( $T45^\circ$ .E.15d.34%) como se observa en la Figura A3.5. También se puede observar que el módulo de elasticidad a tracción de la probeta con tejido alternado posee un valor intermedio entre sus orientaciones base de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ .

### Gráfico de Cajas y Bigotes

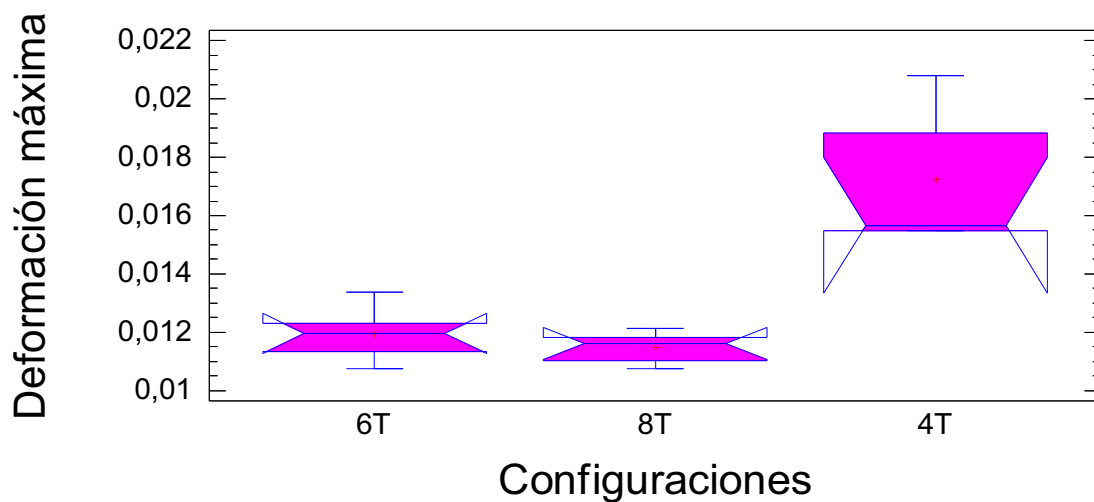


Figura A3.6. Deformación máxima a tracción de las configuraciones 6T ( $T0^\circ$ .E.15d.34%), 8T (A.E.15d.34%) y 4T ( $T45^\circ$ .E.15d.34%)



En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima a tracción de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 8T (A.E.15d.34%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 4T (T45°.E.15d.34%) como se observa en la Figura A3.6. También se puede observar que la deformación máxima a tracción de la probeta con tejido alternado posee un valor intermedio entre sus orientaciones base de 0° y 45°.

Para que el nuevo material poliéster-cabuya desarrolle enteramente sus propiedades, el proceso de curado debe llevarse a cabo por completo lo cual requiere un tiempo mínimo de 15 días, pero existe la posibilidad de reducirlo mediante el uso de una estufa. Por este motivo se plantea la opción de realizar el curado con temperatura. La temperatura seleccionada es de 40 °C ya que es una temperatura que se puede alcanzar con relativa facilidad a nivel artesanal con las condiciones adecuadas e inclusive hasta se podría aprovechar la energía solar.

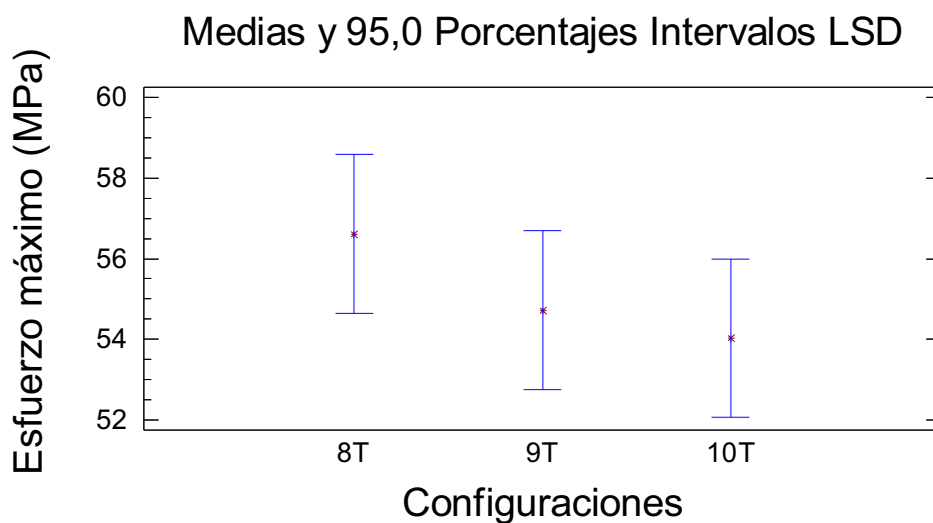


Figura A3.7. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%), 9T (A.E.16h.34%) y 10T (A.E.24h.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones realizadas con diferentes curados como se puede observar en la Figura A3.8

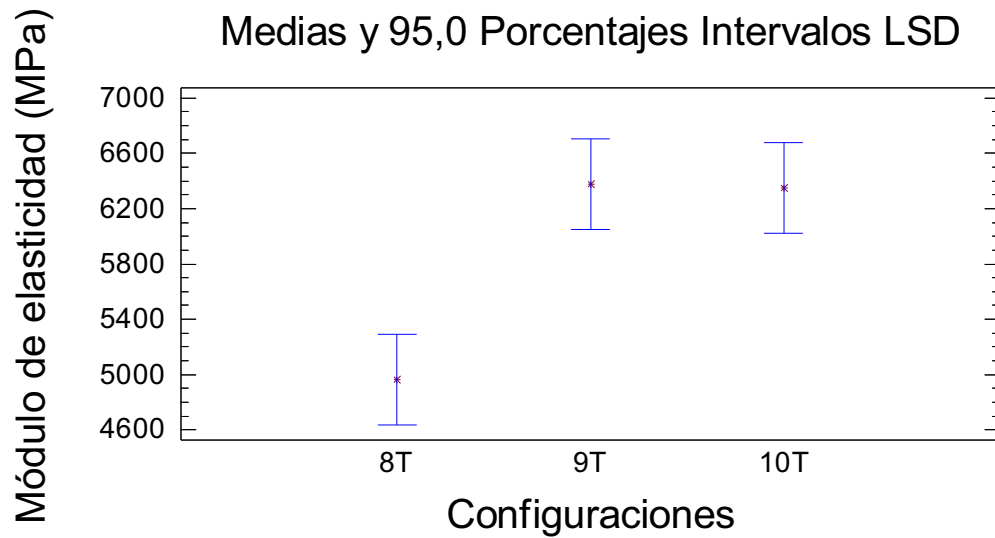


Figura A3.8. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%), 9T (A.E.16h.34%) y 10T (A.E.24h.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 9T (A.E.16h.34%) y 10T (A.E.24h.34%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 8T (A.E.15d.34%) como se observa en la Figura A3.7.

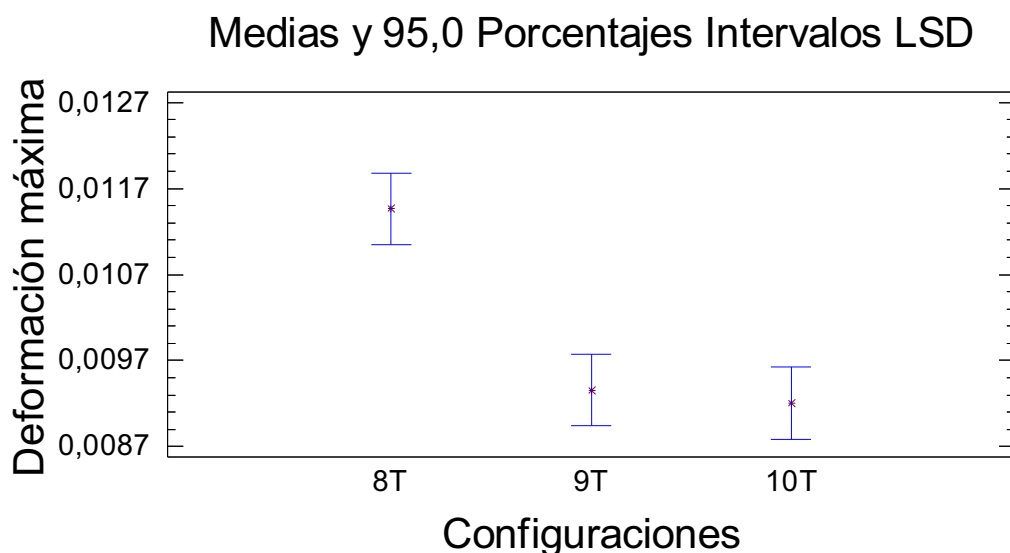


Figura A3.9. Deformación máxima a tracción de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%), 9T (A.E.16h.34%) y 10T (A.E.24h.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima a tracción de las configuraciones 9T (A.E.16h.34%) y 10T (A.E.24h.34%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 8T (A.E.15d.34%) como se observa en la Figura A3.9.

Todas las probetas realizadas hasta el momento contienen estireno como elemento constitutivo de la matriz de poliéster, pero existe la posibilidad de prescindir del mismo y observar cómo se ven afectadas las propiedades. Para este propósito se elaboraron probetas de las configuraciones T0°.15d.34% y A.15d.34% que se comparan frente a sus respectivas configuraciones con estireno.

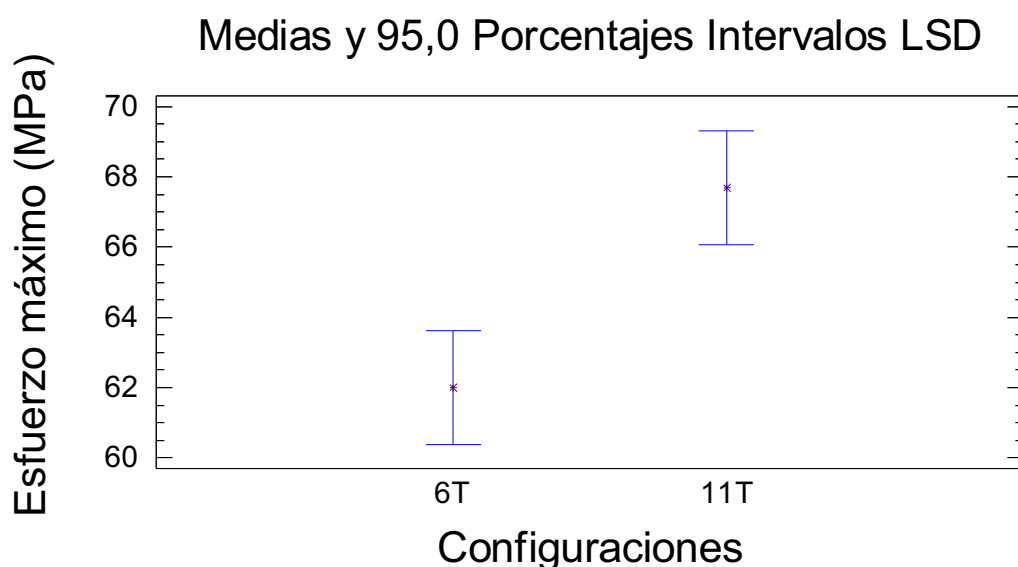


Figura A3.10. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 11T (T0°.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 11T (T0°.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.10. Además se puede apreciar que existe un incremento del esfuerzo máximo a tracción al prescindir de estireno.

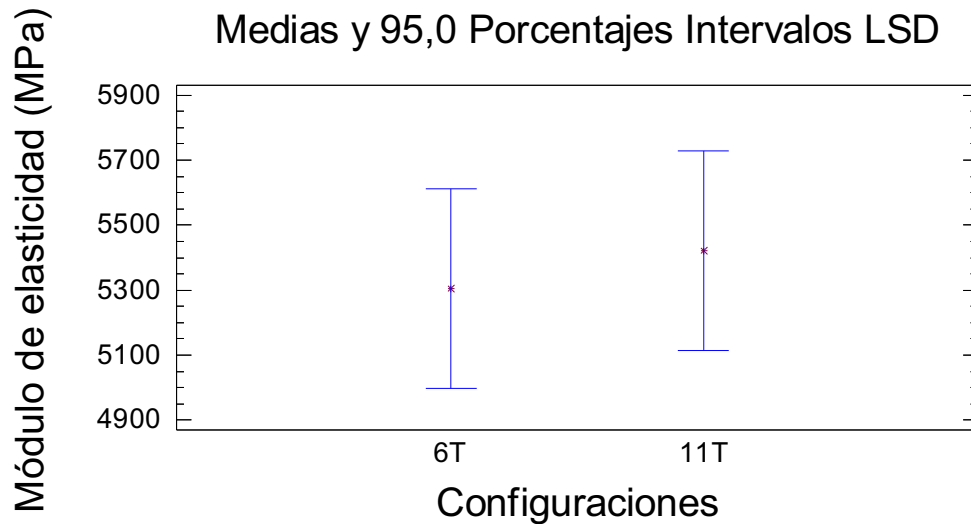


Figura A3.11. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 11T (T0°.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 11T (T0°.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.11. Además se puede apreciar que existe un pequeño incremento del módulo de elasticidad a tracción al prescindir de estireno.

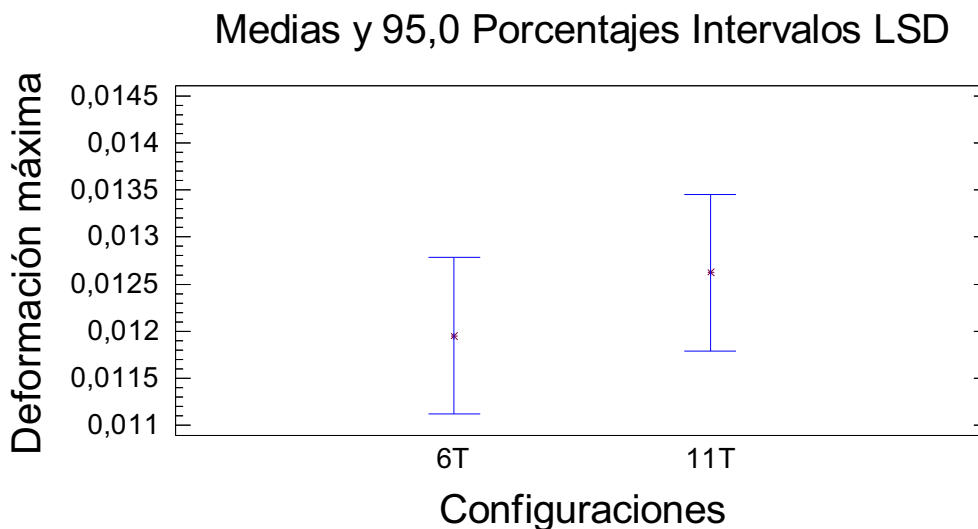


Figura A3.12. Deformación máxima a tracción de las configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 11T (T0°.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las

configuraciones 6T (T0°.E.15d.34%) y 11T (T0°.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.12.

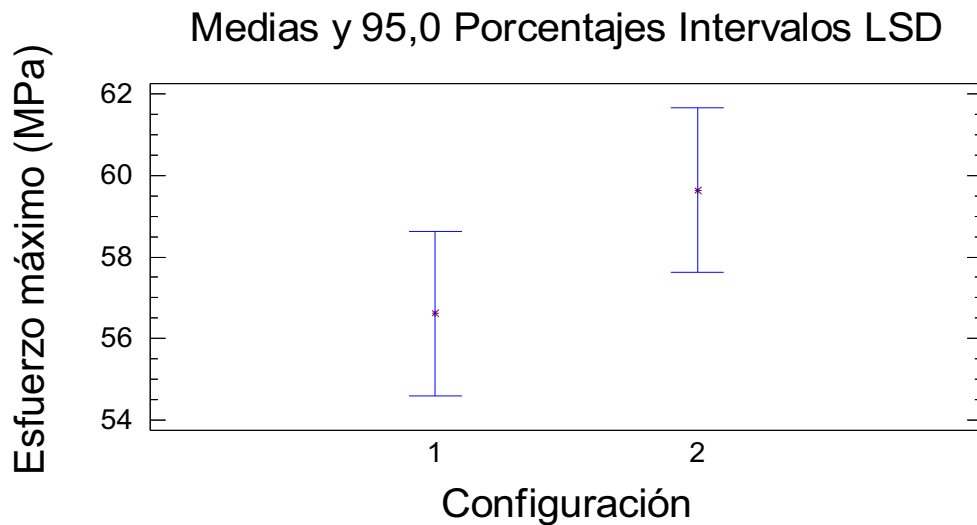


Figura A3.13. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%) y 12T (A.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%) y 12T (A.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.13. Además se puede apreciar que existe un incremento del esfuerzo máximo a tracción al prescindir de estireno.

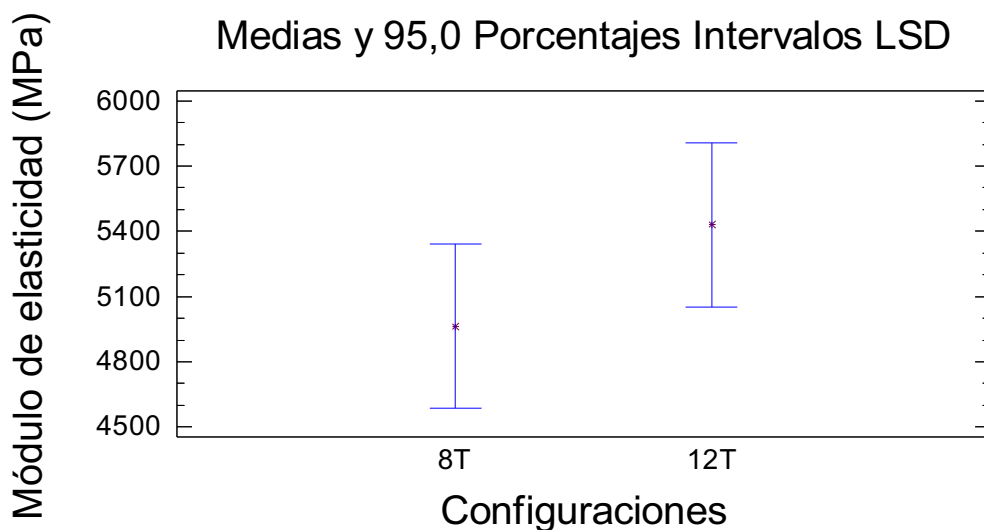


Figura A3.14. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%) y 12T (A.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%) y 12T (A.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.14. Además se puede apreciar que existe un pequeño incremento del módulo de elasticidad a tracción al prescindir de estireno.

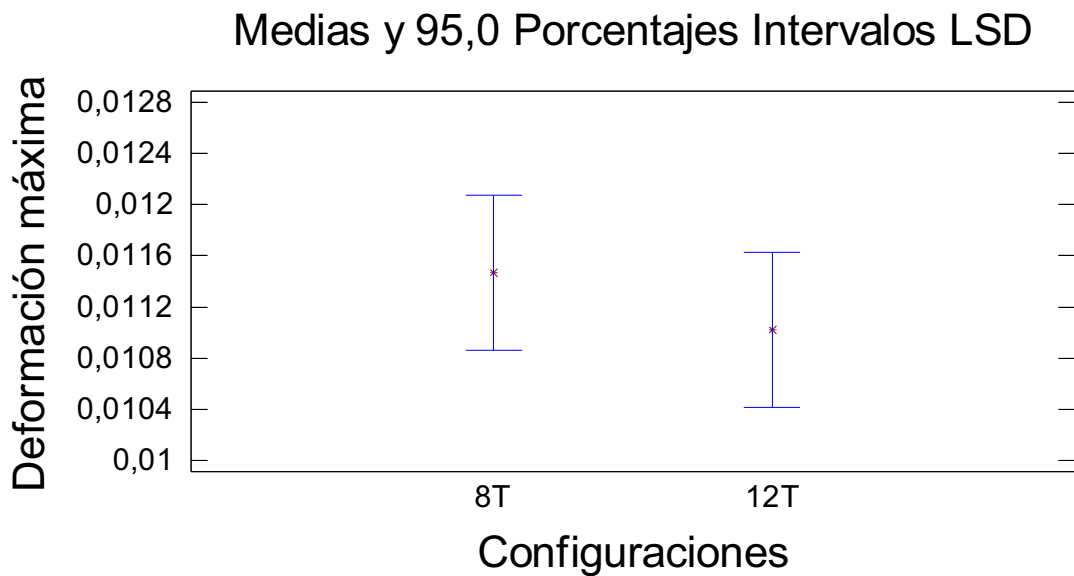


Figura A3.15. Deformación máxima a tracción de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%) y 12T (A.15d.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones 8T (A.E.15d.34%) y 12T (A.15d.34%) como se puede observar en la Figura A3.15.

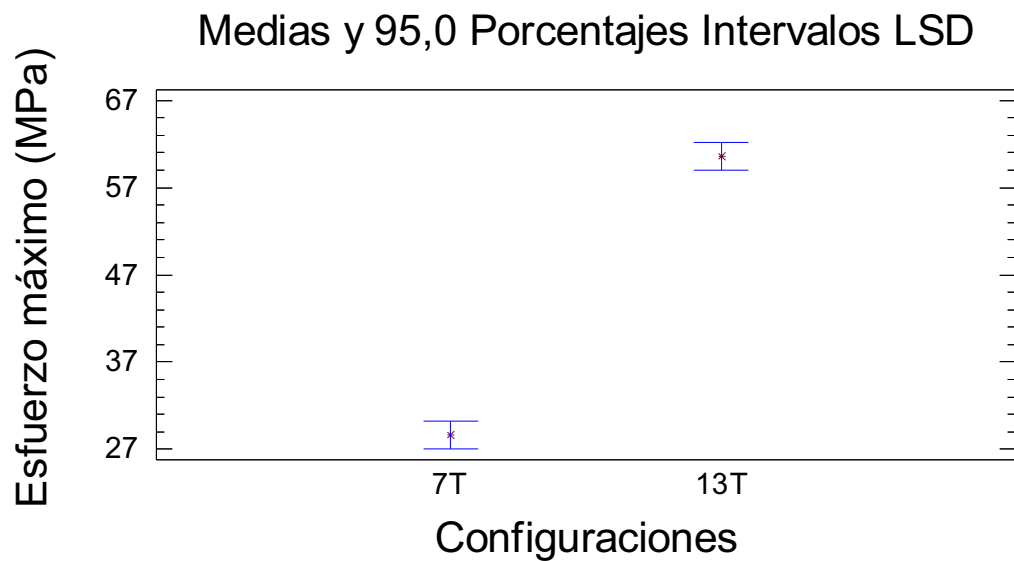


Figura A3.16. Esfuerzo máximo a tracción de las configuraciones 7T (Resina poliéster) y 13T (A.16h.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones 7T (Resina poliéster) y 13T (A.16h.34%) como se puede observar en la Figura A3.16. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del esfuerzo máximo a tracción con respecto a la matriz de poliéster.

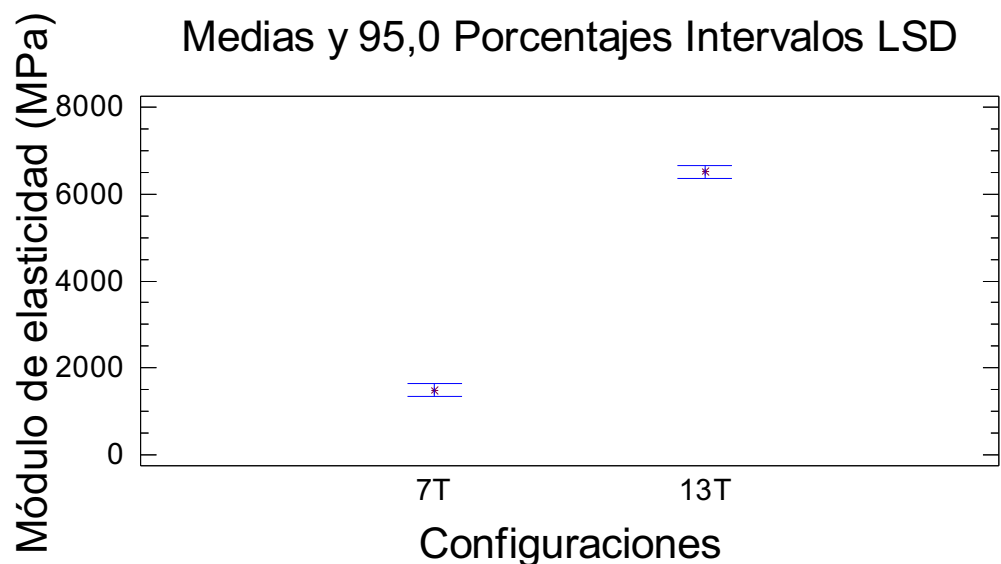


Figura A3.17. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 7T (Resina poliéster) y 13T (A.16h.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones 7T (Resina poliéster) y 13T (A.16h.34%) como se puede observar en la Figura A3.17. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del módulo de elasticidad a tracción con respecto a la matriz de poliéster.

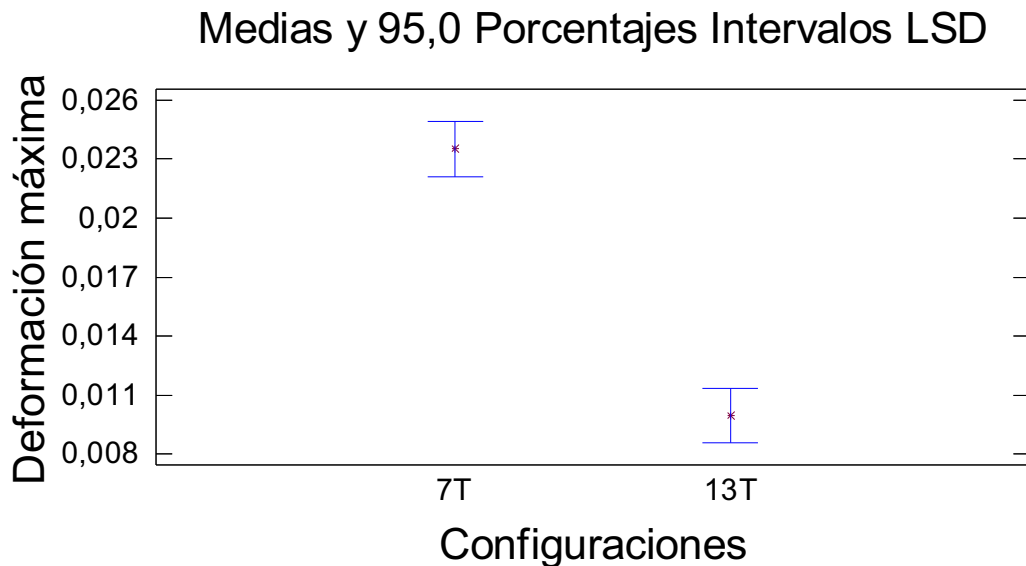


Figura A3.18. Módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 7T (Resina poliéster) y 13T (A.16h.34%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones 7T (Resina poliéster) y 13T (A.16h.34%) como se puede observar en la Figura A3.17. Además se puede apreciar que existe una gran disminución de la deformación máxima a tracción con respecto a la matriz de poliéster.

### **A3.2. ENSAYO DE FLEXIÓN**

En las figuras siguientes se presentan los diagramas de medias de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación de los ensayos realizados a flexión para las diferentes configuraciones. Inicialmente se comparan los diferentes refuerzos utilizados que son: hilo orientado longitudinalmente, tejido orientado a 0° y tejido orientado a 45°. Luego se comparan los efectos de intercalar tejidos con



diferentes orientaciones obteniéndose un refuerzo alternado, además de probar con diferentes curados y prescindir del estireno como constituyente de la matriz.

Antes de presentar las gráficas se presenta la codificación de las configuraciones de los materiales compuestos ensayados a tracción para la adecuada comprensión de las figuras.

Tabla A3.2. Codificación de probetas a flexión

Configuración	Designación	Significado
1F	L.E.15d.23%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,23
2F	L.E.15d.39%	Longitudinal con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,39
3F	T45°.E.15d.26%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,26
4F	T45°.E.15d.30%	Tejido a 45° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
5F	T0°.E.15d.26%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,26
6F	T0°.E.15d.30%	Tejido a 0° con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
7F	Resina poliéster	Resina poliéster
8F	A.E.15d.30%	Tejido alternado con estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
9F	A.E.16h.30%	Tejido alternado con estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40 °C y fracción volumétrica de 0,30
10F	A.E.24h.30%	Tejido alternado con estireno, curado por 24 horas a temperatura de 40 °C y fracción volumétrica de 0,30
11F	T0°.15d.30%	Tejido a 0° sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
12F	A.15d.30%	Tejido alternado sin estireno, curado por 15 días a temperatura ambiente y fracción volumétrica de 0,30
13F	A.16h.30%	Tejido alternado sin estireno, curado por 16 horas a temperatura de 40 °C y fracción volumétrica de 0,30

Una vez definida la codificación de las diferentes configuraciones, se procede con el análisis mediante el método ANOVA de comparación de datos. Las propiedades examinadas fueron: esfuerzo máximo a la flexión, módulo de elasticidad y deformación máxima. Inicialmente se realizó el análisis de los diferentes refuerzos de hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientados a 0° y resina poliéster.

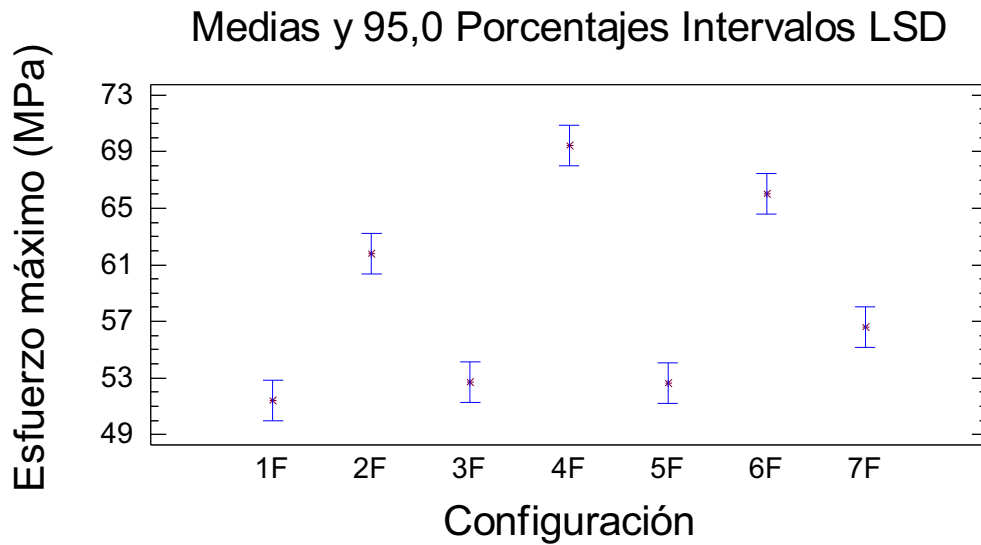


Figura A3.19. Esfuerzo máximo a la flexión de materiales compuestos con hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientado a 0° y resina poliéster.

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones excepto entre 1F (L.E.15d.23%) y 3F (T45°.E.15d.26%); 1F (L.E.15d.23%) y 5F (T0°.E.15d.28%); 3F (T45°.E.15d.26%) y 5F (T0°.E.15d.26%) como se puede observar en la Figura A3.19. También se puede observar que la configuración de más alto valor de esfuerzo máximo a la flexión es la 4F (T45°.E.15d.30%).

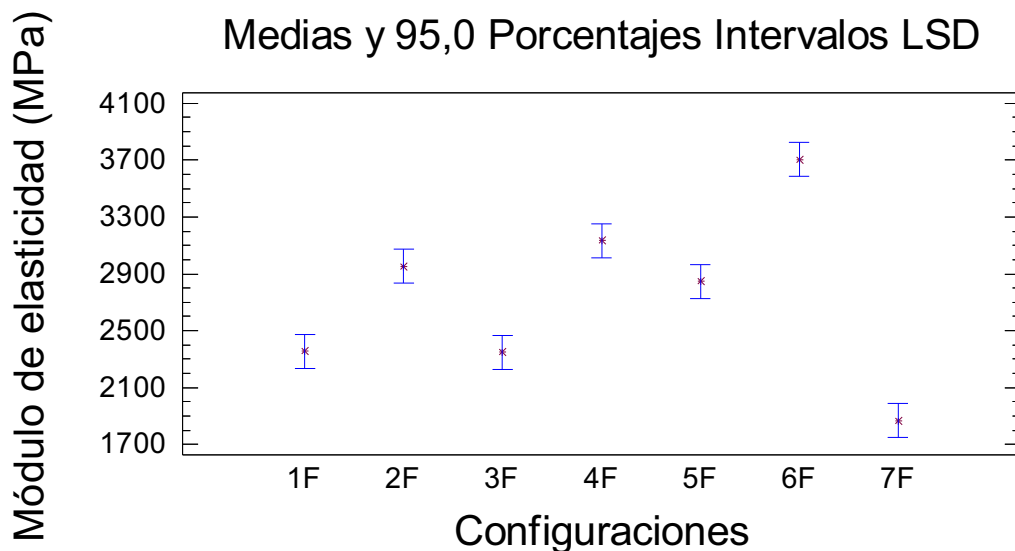


Figura A3.20. Módulo de elasticidad a la flexión de materiales compuestos con hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientado a 0° y resina poliéster.

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de todas las configuraciones excepto entre 1F (L.E.15d.23%) y 3F (T45°.E.15d.26%); 2F (L.E.15d.39%) y 4F (T45°.E.15d.30%); 2F (L.E.15d.39%) y 5F (T0°.E.15d.26%); como se observa en la Figura A3.20. También se puede observar que todas las configuraciones con refuerzo de cabuya tienen un incremento módulo de elasticidad con respecto a la resina poliéster siendo la de mayor valor la configuración 6F (T0°.E.15d.30%).

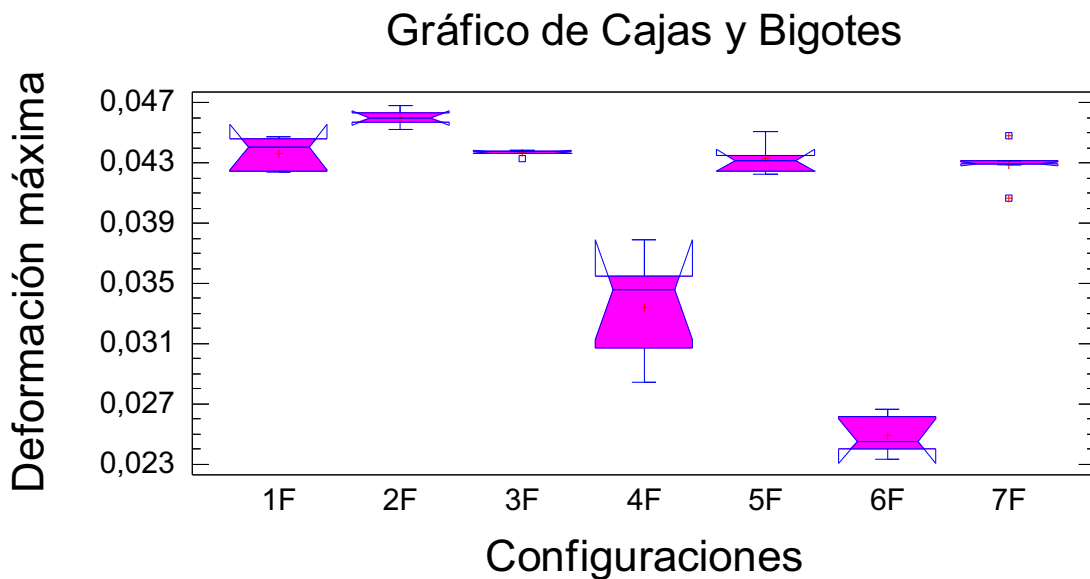


Figura A3.21. Deformación máxima a la flexión de materiales compuestos con hilo de cabuya, tejido orientado a 45°, tejido orientado a 0° y resina poliéster.

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de casi todas las configuraciones excepto entre 1F (L.E.15d.23%), 3F (T45°.E.15d.28%), 5F (T0°.E.15d.28%) y 7F (Resina) como se observa en la Figura A3.21. También se puede observar que la configuración 6F (T0°.E.15d.34%) es la que presenta una menor deformación.

De la misma manera que en los ensayos a tracción se busca obtener un material similar al isotrópico por lo que se dispone trabajar con tejido en capas alternadas, es decir una capa orientada a 0° y la siguiente a 45° hasta completar el número de capas precisado para la fracción volumétrica determinada, que este caso resulta ser 0,30 ya que ofrece mejores propiedades que con fracción volumétrica de 0,26.

Simultáneamente se buscó analizar el efecto variar el curado del material, elaborando diferentes probetas con curado a temperatura ambiente durante 15 días, curado a 40 °C por 16 horas y curado a 40 °C por 24 horas.

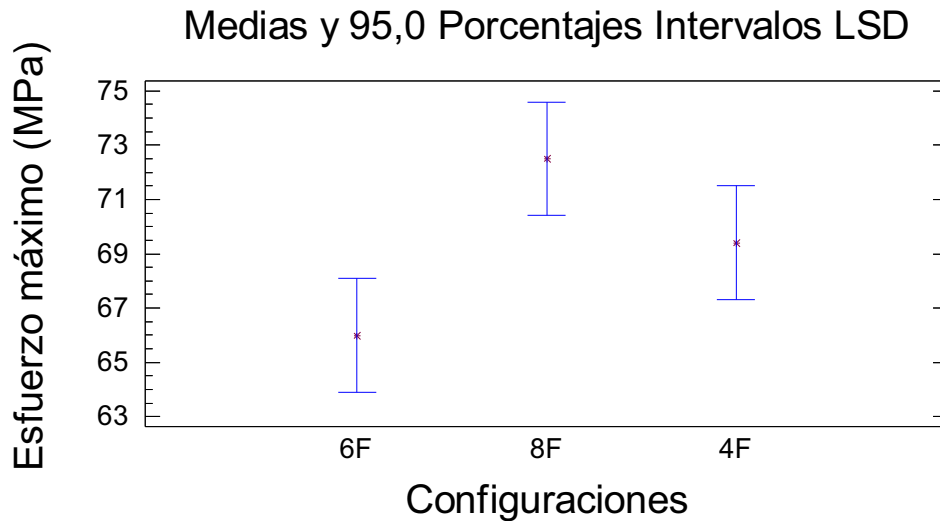


Figura A3.22. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%), 8F (A.E.15d.30%) y 4F (T45°.E.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo únicamente en las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 8F (A.E.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.22. Además se puede observar que el mayor valor de esfuerzo máximo a flexión se obtiene con tejido alternado.

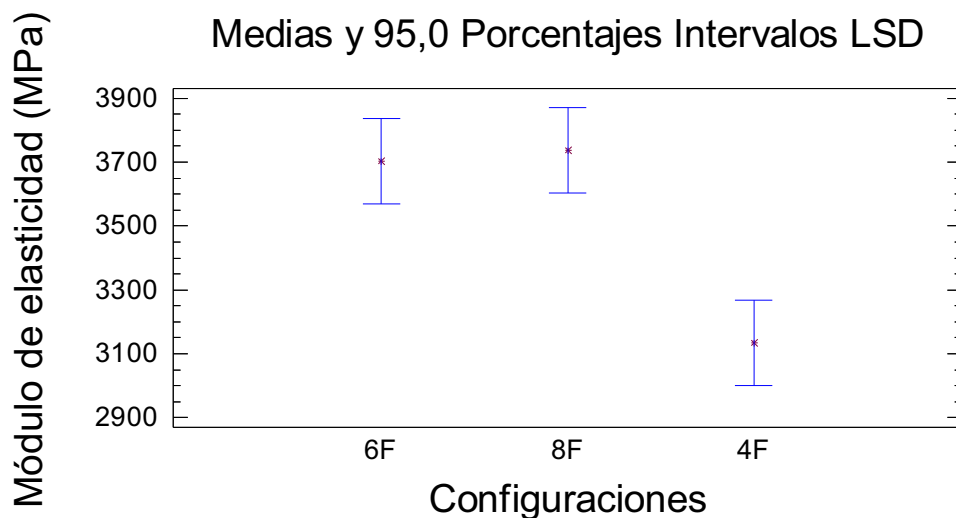


Figura A3.23. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%), 8F (A.E.15d.30%) y 4F (T45°.E.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a tracción de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 8F (A.E.15d.30%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 4F (T45°.E.15d.30%) como se observa en la Figura A3.23. También se puede observar que el módulo de elasticidad a flexión de la probeta con tejido alternado posee el mayor valor.

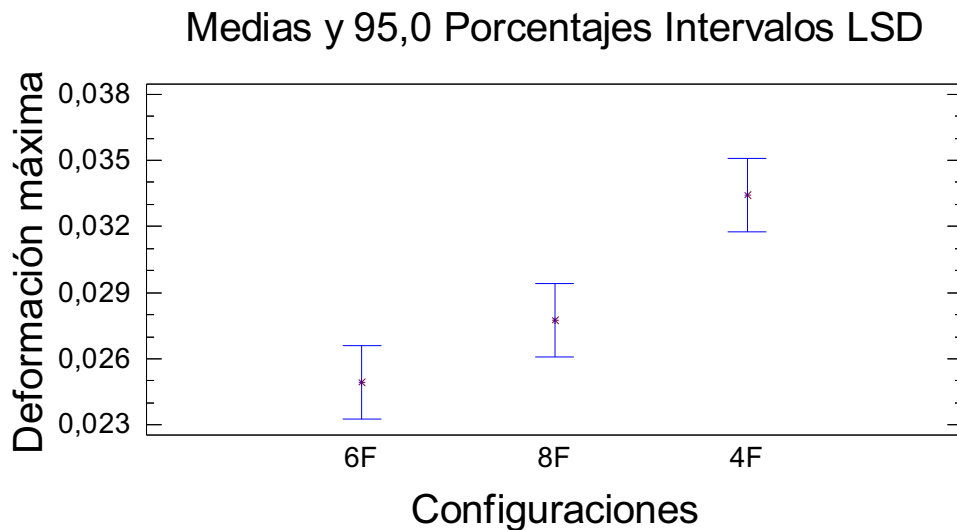


Figura A3.24. Deformación máxima a flexión de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%), 8F (A.E.15d.30%) y 4F (T45°.E.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima a tracción de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 8F (A.E.15d.30%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 4F (T45°.E.15d.30%) como se observa en la Figura A3.24. También se puede observar que la deformación máxima a flexión de la probeta con tejido alternado posee un valor intermedio entre sus orientaciones base de 0° y 45°.

Para que el nuevo material poliéster-cabuya desarrolle enteramente sus propiedades, el proceso de curado debe llevarse a cabo por completo lo cual

requiere un tiempo mínimo de 15 días, pero existe la posibilidad de reducirlo mediante el uso de una estufa. Por este motivo se plantea la opción de realizar el curado con temperatura. La temperatura seleccionada es de 40 °C ya que es una temperatura que se puede alcanzar con relativa facilidad a nivel artesanal con las condiciones adecuadas e inclusive hasta se podría aprovechar la energía solar.

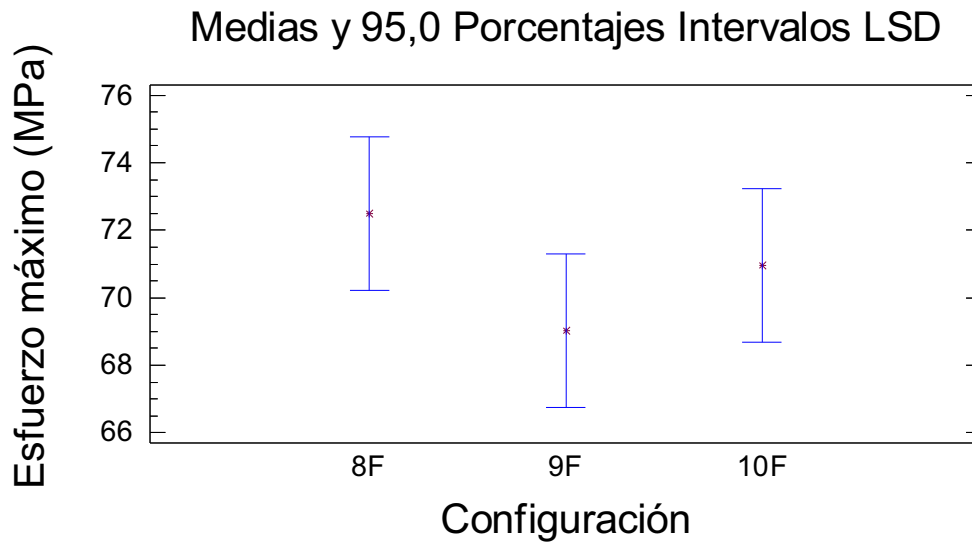


Figura A3.25. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%), 9F (A.E.16h.30%) y 10F (A.E.24h.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones realizadas con diferentes curados como se puede observar en la Figura A3.25.

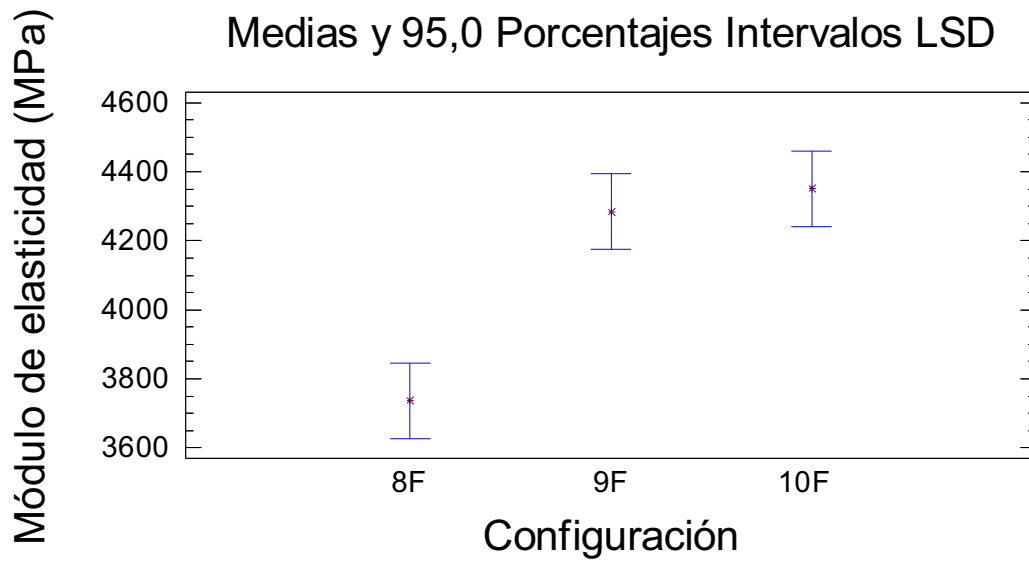


Figura A3.26. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%), 9F (A.E.16h.30%) y 10F (A.E.24h.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 9T (A.E.16h.30%) y 10T (A.E.24h.30%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 8T (A.E.15d.30%) como se observa en la Figura A3.26.

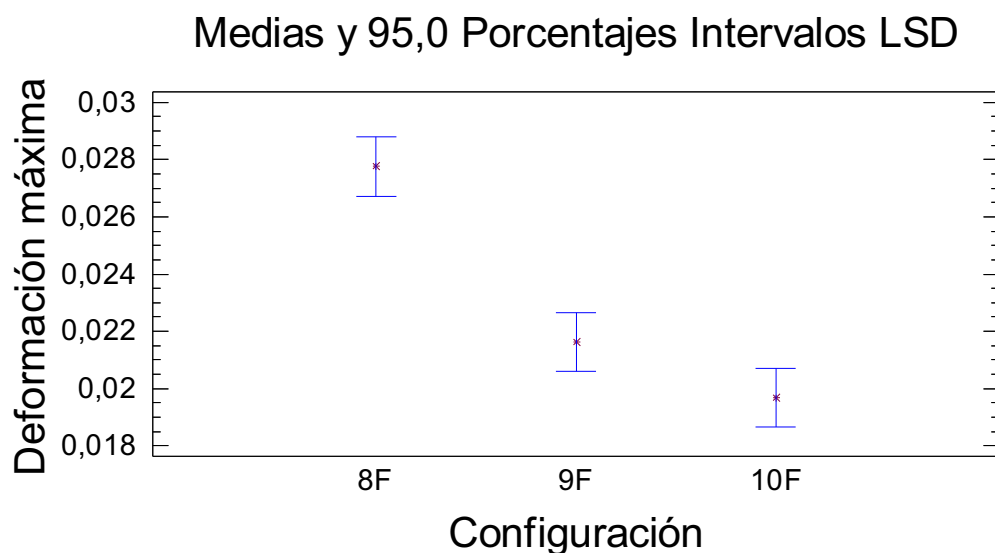


Figura A3.27. Deformación máxima a flexión de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%), 9F (A.E.16h.30%) y 10F (A.E.24h.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 9F (A.E.16h.30%) y 10F (A.E.24h.30%) pero si existe diferencia estadísticamente significativa de cualquiera de las dos con respecto a la configuración 8F (A.E.15d.30%) como se observa en la Figura A3.27.

Todas las probetas realizadas hasta el momento contienen estireno como elemento constitutivo de la matriz de poliéster, pero existe la posibilidad de prescindir del mismo y observar cómo se ven afectadas las propiedades. Para este propósito se elaboraron probetas de las configuraciones T0°.15d.30% y A.15d.30% que se comparan frente a sus respectivas configuraciones con estireno.

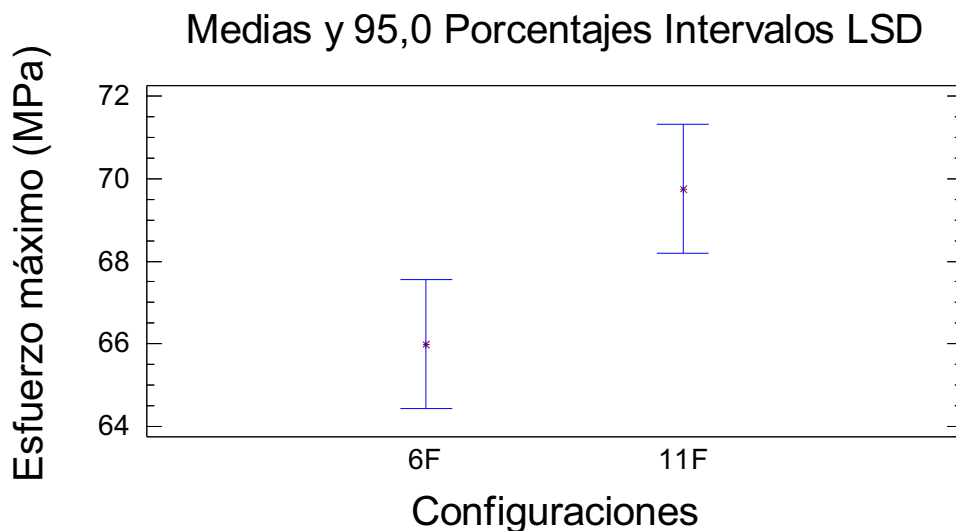


Figura A3.28. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 11F (T0°.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 11F (T0°.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.28. Además se puede apreciar que existe un incremento del esfuerzo máximo a flexión al prescindir de estireno.



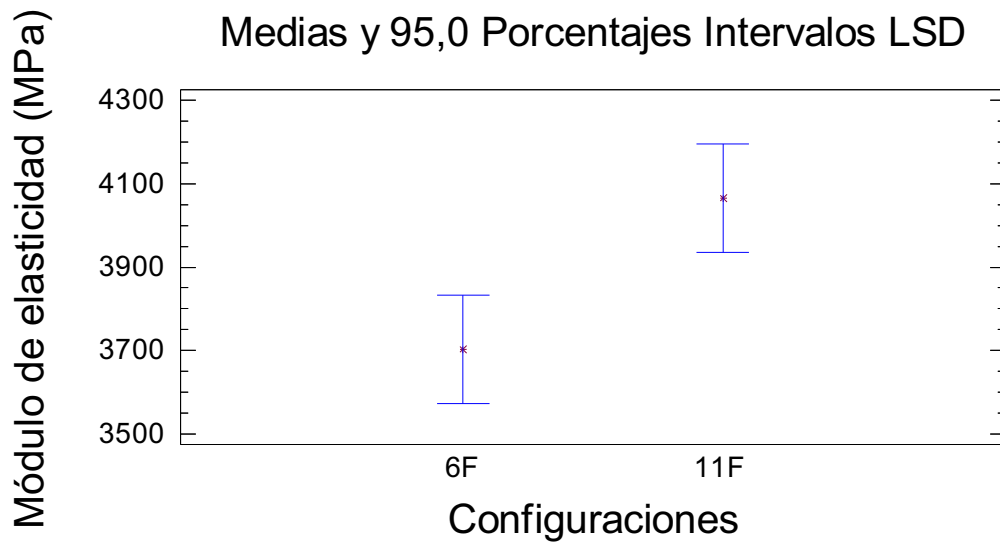


Figura A3.29. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 11F (T0°.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 11F (T0°.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.29. Además se puede apreciar que existe un incremento del módulo de elasticidad a tracción al prescindir de estireno.

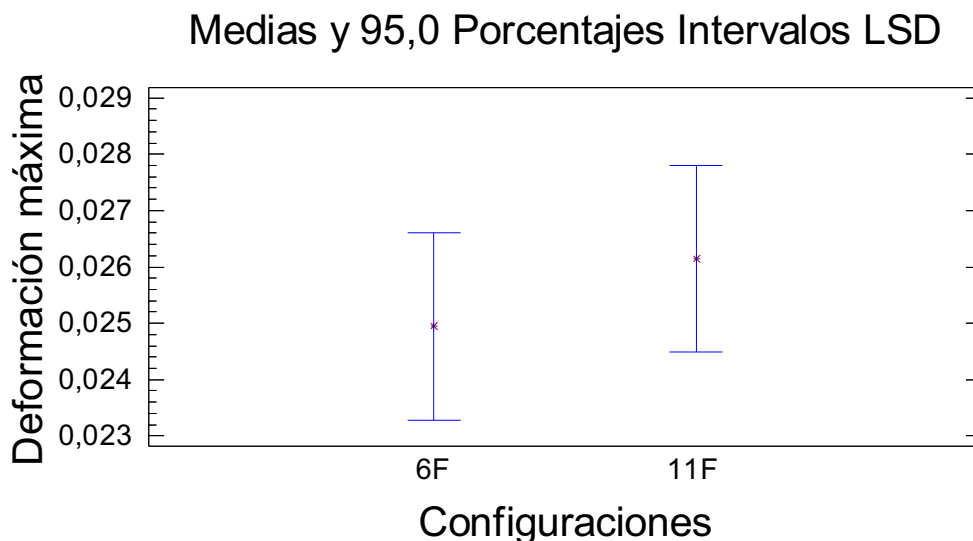


Figura A3.30. Deformación máxima a flexión de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 11F (T0°.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones 6F (T0°.E.15d.30%) y 11F (T0°.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.30.

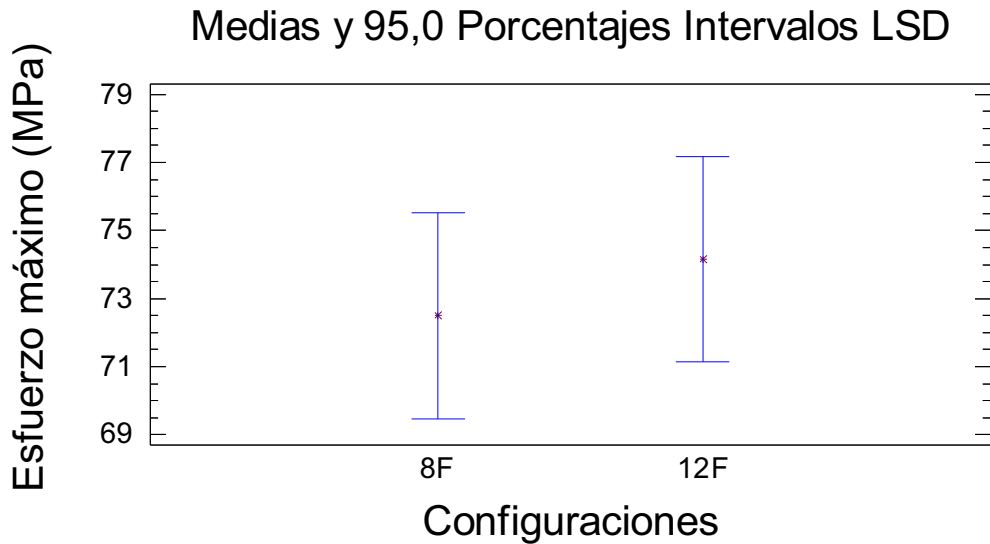


Figura A3.31. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%) y 12F (A.15d.30%)

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%) y 12F (A.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.31. Además se puede apreciar que existe un pequeño incremento del esfuerzo máximo a flexión al prescindir de estireno.

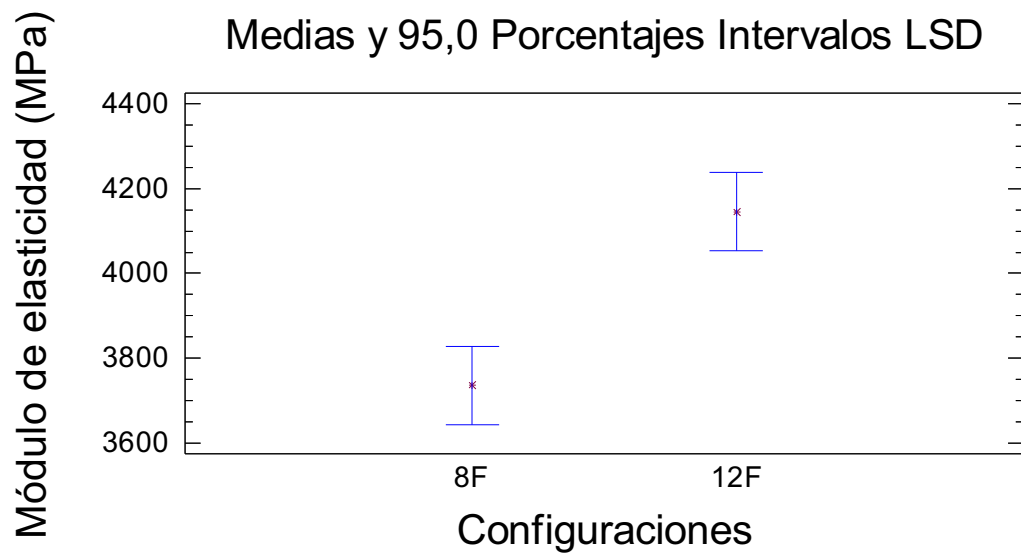


Figura A3.32. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%) y 12F (A.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%) y 12F (A.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.32. Además se puede apreciar que existe un incremento del módulo de elasticidad a flexión al prescindir de estireno.

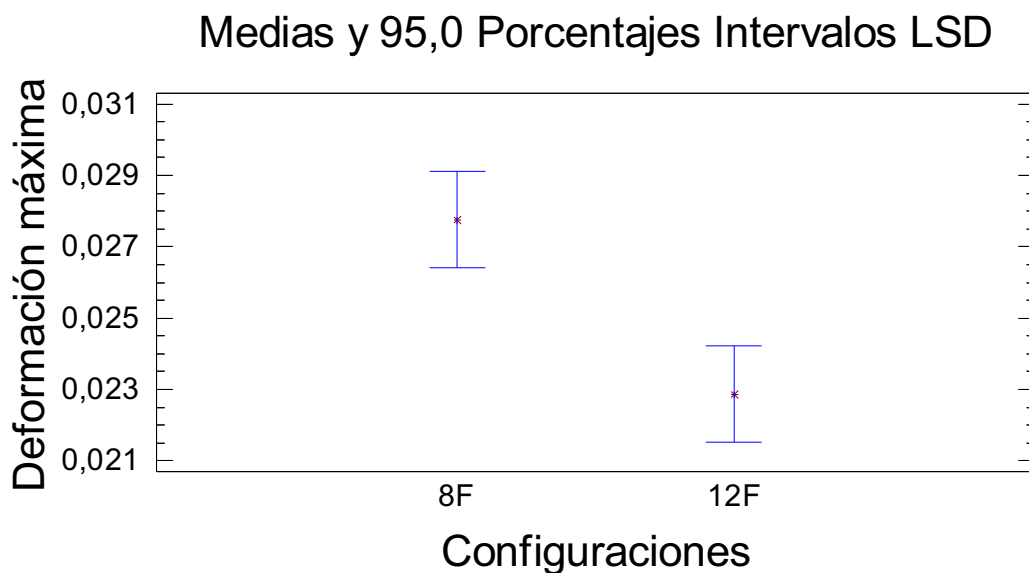


Figura A3.33. Deformación máxima a flexión de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%) y 12F (A.15d.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones 8F (A.E.15d.30%) y 12F (A.15d.30%) como se puede observar en la Figura A3.33.

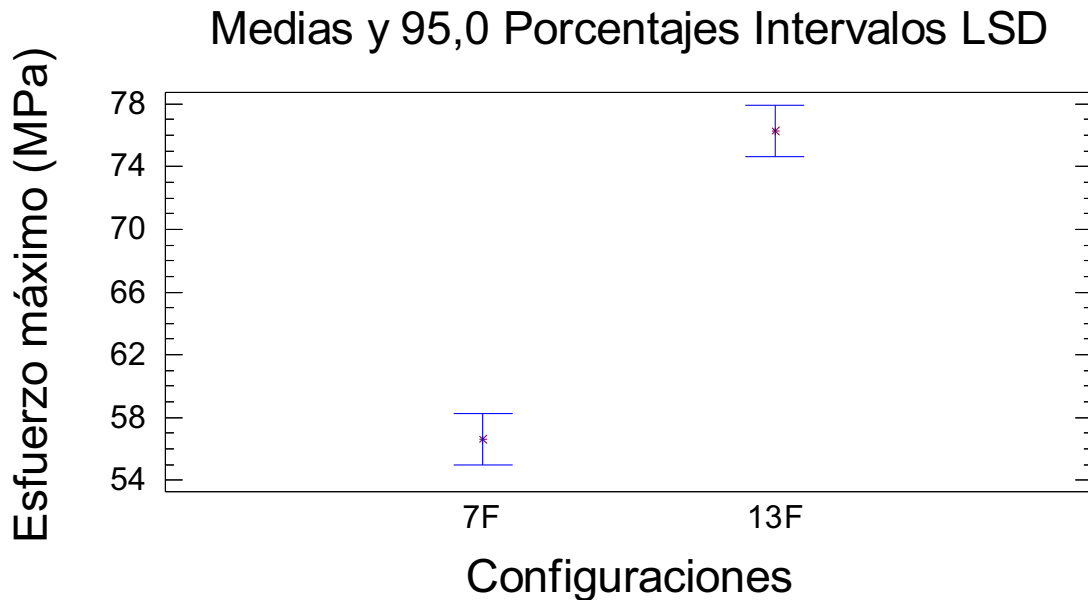


Figura A3.34. Esfuerzo máximo a flexión de las configuraciones 7F (Resina poliéster) y 13F (A.16h.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del esfuerzo máximo de las configuraciones 7F (Resina poliéster) y 13F (A.16h.30%) como se puede observar en la Figura A3.34. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del esfuerzo máximo a tracción con respecto a la matriz de poliéster.

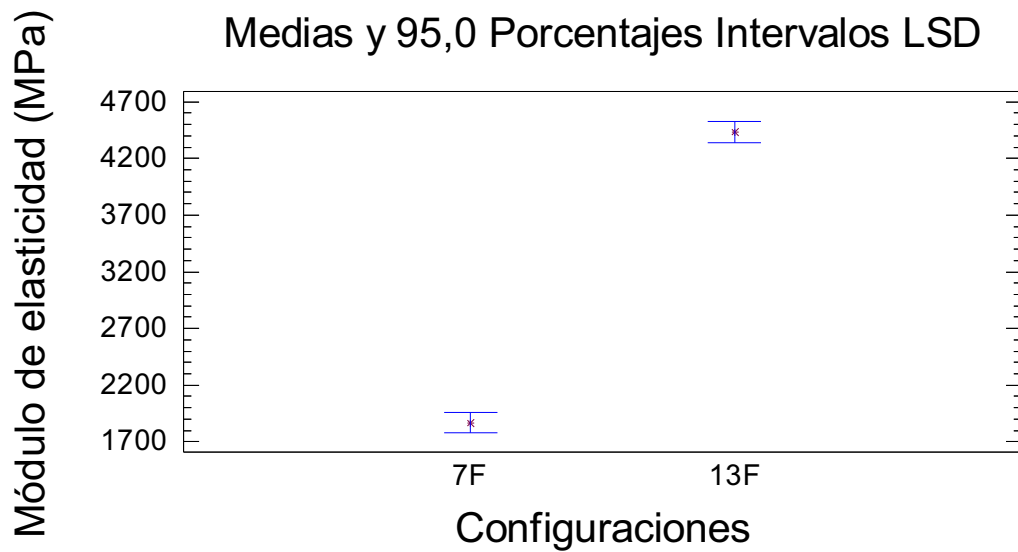


Figura A3.35. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 7F (Resina poliéster) y 13F (A.16h.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del módulo de elasticidad de las configuraciones 7F (Resina poliéster) y 13F (A.16h.30%) como se puede observar en la Figura A3.35. Además se puede apreciar que existe un gran incremento del módulo de elasticidad a flexión con respecto a la matriz de poliéster.

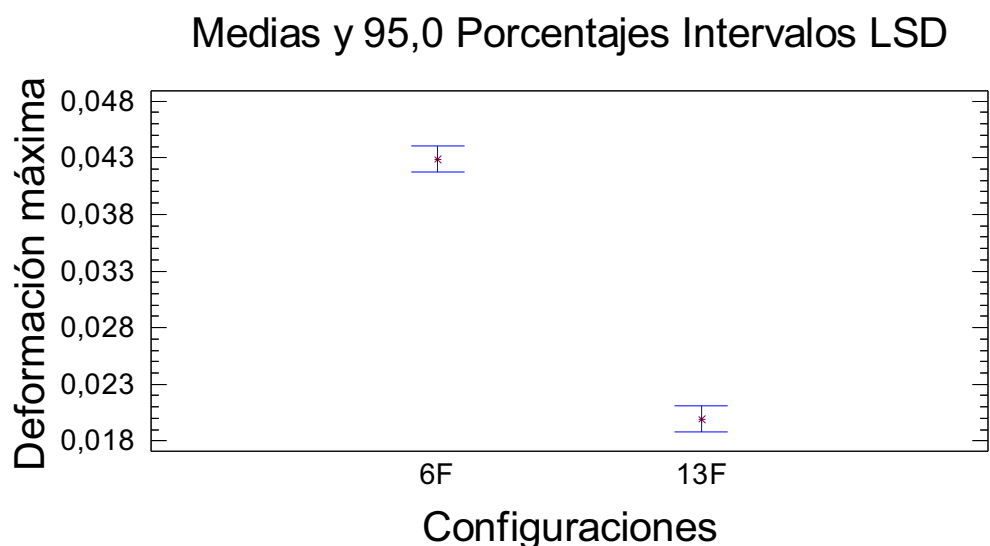


Figura A3.36. Módulo de elasticidad a flexión de las configuraciones 7F (Resina poliéster) y 13F (A.16h.30%).

En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la deformación máxima de las configuraciones 7F (Resina poliéster) y 13F (A.16h.30%) como se puede observar en la Figura A3.36. Además se puede apreciar que existe una gran disminución de la deformación máxima a flexión con respecto a la matriz de poliéster.

### A3.3. ENSAYO DE IMPACTO

En la figura siguiente se presenta un diagrama con la energía absorbida a impacto por el material que obtuvo la mejor combinación de propiedades que fue A.16h.26% (Alternado sin estireno con curado a temperatura de 40°C durante 16 horas y fracción volumétrica de 0,26) comparado con la energía absorbida por la matriz de resina poliéster.

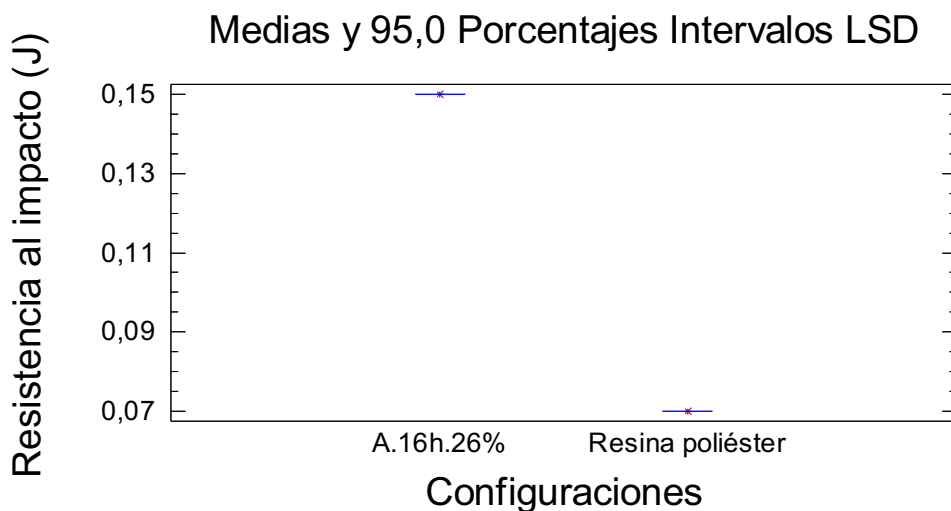













Figura A3.37. Resistencia al impacto de las configuraciones A.16h.26% y Resina poliéster.



En análisis estadístico de ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la resistencia al impacto de las configuraciones A.16h.30% y Resina poliéster como se puede observar en la Figura A3.36. Además se puede apreciar que existe un gran incremento de la energía absorbida al impacto con respecto a la matriz de poliéster.

## ANEXO 4. PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Almacenamiento de resina y fibras	Se recomienda mantener la resina y la fibra a temperatura ambiente.	
2	Preparación de fibra	Corte de fibra a dimensiones del molde.	
3	Preparación de molde	Limpieza y aplicación de cera desmoldante.	
4	Preparación de mezcla	<p>Mezcla de poliéster, octoato de cobalto y MEKP.</p> <p>Depende del espesor de lámina a realizar.</p>	
5	Colocación de matriz y refuerzo en el molde	Distribución uniforme de resina y cabuya dentro del molde.	

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
6	Aplicación de presión	Aplicación de 1000 psi de presión en prensa hidráulica.	
7	Solidificación	Esperar tiempo de gelificación y solidificación. 80 min.	
8	Retirar presión	Despresurizar la prensa para retirar los moldes.	
9	Desmoldeo	Abrir moldes para retirar probetas del interior.	
10	Cortar bordes	Eliminar rebabas de aristas.	
11	Curado	Depende del proceso: 16 h con temperatura de 40°C. 15 d a temperatura ambiente.	



Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
12	Lijado de aristas	<p>Mejorar acabado superficial.</p> <p>Comprobar dimensiones normalizadas.</p>	
13	Inspección del acabado	<p>Revisión visual del acabado final de las probetas comprobación dimensional.</p>	

**ANEXO 5. FICHA TÉCNICA DE LA RESINA POLIÉSTER ANDERPOL 859**

**ANEXO 6. PLANOS DEL PROTOTIPO**