

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**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**

HÉCTOR GUILLERMO VILLACÍS SALAZAR

hector_villacis@yahoo.com

DIRECTOR: VICTOR HUGO GUERRERO, Ph.D.

victor.guerrero@epn.edu.ec

Quito, Julio de 2011

DECLARACIÓN

Yo, Héctor Guillermo Villacís Salazar, 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.

Héctor Guillermo Villacís Salazar

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Héctor Guillermo Villacís Salazar, bajo mi supervisión.

Víctor Guerrero, Ph.D.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Víctor Guerrero por su acertada dirección en el presente proyecto de titulación.

A las personas que trabajan en los laboratorios de Nuevos Materiales y Análisis de Esfuerzos, en especial a la Ing. Salomé Galeas, Ing. Sofía Salazar, Ing. Orlando Cobos, Jorge Cevallos, Fabio Delgado, Sebastián Ponce y José Luis Dávila, por la colaboración que me brindaron en el desarrollo de este proyecto.

A mis hermanos Silvia, Mauricio, Ivette y especialmente a Janeth por su apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida, y extenderme sus manos para levantarme cuando he caído.

A mis amigos al compartir tantas alegrías, triunfos, tristezas y derrotas, se van convirtiendo en una familia; en especial a Daniel Ligna y Darwin Guamán, quienes me ayudaron cuando más necesité en la ejecución de la parte experimental del proyecto.

DEDICATORIA

A Dios por no desampararme en los momentos difíciles y brindarme la fuerza y la fe para seguir luchando por mis sueños.

A mis padres Gloria y Raúl, por su apoyo incondicional, cuidados, cariño y principalmente con su ejemplo formarme como ser humano y a luchar por alcanzar mis metas.

CONTENIDO

CONTENIDO	vi
CONTENIDO DE FIGURAS	ix
CONTENIDO DE TABLAS	xx
CAPÍTULO 1	1
COMPUESTOS HÍBRIDOS	1
1.1. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE.....	1
1.1.1. RESINA POLIÉSTER.....	4
1.1.2. FIBRA DE VIDRIO.....	8
1.1.2.1. Proceso de fabricación de la fibra de vidrio.....	9
1.1.2.2. Propiedades de la fibra de vidrio.....	11
1.2. COMPUESTOS LIGNOCELULÓSICOS.....	14
1.2.1. ABACÁ: CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS Y VARIEDADES.....	16
1.2.2. PROPIEDADES Y APLICACIONES DE LA FIBRA DE ABACÁ.....	18
1.3. INTERFAZ FIBRA-MATRIZ.....	20
1.4. COMPUESTOS HÍBRIDOS.....	24
1.5. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS.....	29
1.5.1. ETAPAS Y PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO DE COMPUESTOS.....	29
1.5.2. LAMINADO MANUAL (HAND LAY-UP).....	31
1.5.2.1. Fabricación de piezas.....	31
1.5.2.2. Ventajas y limitaciones del proceso de laminado manual.....	32
1.5.3. MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	33
1.5.4. CORTE.....	34
1.5.5. TALADRADO.....	34
1.6. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	36
1.6.1. OBJETIVOS.....	36
1.6.2. ALCANCE.....	37
CAPÍTULO 2	38

2.1.	MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO.....	38
2.1.1.	MATERIALES	41
2.1.1.1.	Fibra de abacá.....	41
2.1.1.2.	Fibra de vidrio.....	41
2.1.1.3.	Resina poliéster.....	42
2.1.2.	EQUIPOS Y MOLDES	44
2.2.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	51
2.3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	55
2.3.1.	ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS	55
2.3.2.	ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO	57
2.3.3.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO	59
2.3.3.1.	Ensayo de tracción, flexión e impacto.....	60
2.3.3.2.	Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del prototipo	61
CAPÍTULO 3	63
3.1.	ENSAYOS PRELIMINARES.....	63
3.1.1.	DETERMINACIÓN DE LA MEJOR FRACCIÓN VOLUMÉTRICA	64
3.1.1.1.	Esfuerzo máximo	72
3.1.1.2.	Deformación a la ruptura	78
3.1.1.3.	Módulo de elasticidad.....	82
3.1.1.4.	Densidad de los materiales compuestos	88
3.1.2.	SELECCIÓN DE LA MEJOR FRACCIÓN VOLUMÉTRICA	92
3.2.	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	94
3.2.1.	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	103
3.2.1.1.	Esfuerzo máximo	106
3.2.1.2.	Deformación a la ruptura	112
3.2.1.3.	Módulo de elasticidad.....	115
3.2.1.4.	Densidad de los materiales compuestos híbridos	122
3.2.2.	ENSAYO DE FLEXIÓN	126
3.2.2.1.	Esfuerzo máximo a la flexión.....	128
3.2.2.2.	Deformación máxima	134

3.2.2.3.	Módulo a la flexión.....	136
3.2.3.	ENSAYO DE IMPACTO	151
3.2.4.	SELECCIÓN DEL PROTOTIPO A CONSTRUIRSE.....	157
3.2.5.	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PROTOTIPO	161
3.2.5.1.	Propiedades físicas.....	162
3.2.5.2.	Propiedades mecánicas	166
3.2.5.2.1.	Ensayo de tracción	166
3.2.5.2.2.	Ensayo de flexión.....	171
3.2.5.2.3.	Prueba funcional	176
3.2.6.	ESTIMACIÓN DE COSTOS	177
CAPÍTULO 4	179
4.1.	CONCLUSIONES	179
4.2.	RECOMENDACIONES.....	182
BIBLIOGRAFÍA	184
ANEXOS	189

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1.	Curva esfuerzo-deformación de la resina poliéster.	8
Figura 1.2.	Presentaciones comerciales de la fibra de vidrio (a) Fibra corta. (b) Mats. (c) Tejidos. (d) Hilados. (e) Mechas. [Hearle, 2001; Internet 2].....	10
Figura 1.3.	Planta de abacá de la variedad Tangongón Rojo. [Pontón, 2009].....	18
Figura 1.4.	Usos de la fibra de abacá. [Internet 3].....	19
Figura 1.5.	Humectación de la matriz sobre la superficie del refuerzo. [Mazumdar, 2002]	21
Figura 1.6.	Esquema del proceso de producción por laminación manual. [Manzumdar,,2002]	32
Figura 1.7.	Esquema de las delaminaciones causadas por el proceso de taladrado. (a) Al inicio del proceso. (b) Al finalizar el proceso. [Manzumdar,,2002]	35
Figura 2.1.	Probetas de material compuesto híbrido. (a) Probeta de tracción. (b) Probeta de flexión. (c) Probeta de impacto.	38
Figura 2.2.	Esquema del trabajo desarrollado en el presente proyecto.	40
Figura 2.3.	Fibra corta de abacá.	41
Figura 2.4.	Manta de fibra de vidrio.....	42
Figura 2.5.	Muestra de resina poliéster Anderpol 859.....	43
Figura 2.6.	(a) Molde de tracción. (b) Molde de flexión. (c) Molde de impacto.....	44
Figura 2.7.	Prensa hidráulica de 12 toneladas de capacidad utilizada para el moldeo y distancia entre columnas de 66 cm.....	45
Figura 2.8.	Balanza electrónica ADAM de 6000 g de capacidad y 0,1 g de apreciación.....	45
Figura 2.9.	Foulard Ernst Benz LEV 5007 2R con sus adaptaciones. (1) Bobina de alimentación. (2) Caja de encolado. [Pontón, 2009].....	46
Figura 2.10.	Caja de encolado adaptada al Foulard. [Pontón, 2009]	47
Figura 2.11.	Estufa Thermo Scientific modelo Cimarec.	47
Figura 2.12.	Telar manual usado para tejer fibras de abacá.	48

Figura 2.13. (a) Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS. (b) Mordazas cuneiformes. (c) Set de flexión a tres puntos.	49
Figura 2.14. (a) Máquina de impacto por caída de dardo. (b) Dardo.....	49
Figura 2.15. Molde macho-hembra de madera usado en la fabricación del prototipo.	50
Figura 2.16. Caladora Skill modelo 4390 de 600 W de potencia.....	50
Figura 2.17. (a) Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo Súper L. (b) Mordazas Cuneiformes. (c) Set de flexión a tres puntos.	51
Figura 2.18. (a) Molde de tapa. (b) Molde macho-hembra.	52
Figura 2.19. Esquema de la estrategia metodológica seguida en el proyecto de titulación.	54
Figura 2.20. (a) Tejido plano. (b) Tejido sarga. [Pontón, 2009]	56
Figura 2.21. Esquema del proceso seguido en la elaboración del prototipo.	59
Figura 2.22. Probeta para ensayo de tracción del prototipo. (a) Esquema de la probeta (dimensiones en mm). (b) Probeta extraída del prototipo.	61
Figura 3.1. Defectos en las probetas de resina obtenidas con: (a) Molde de tapa. (b) Molde macho-hembra.	64
Figura 3.2. Curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con distintos tipos y configuraciones de fibra. (a) Fibra de vidrio y abacá. (b) 15 vol% de refuerzo. (c) 20 vol% de refuerzo.	67
Figura 3.3. Fractura observada en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster de reforzados con: (a) Mat de fibra de vidrio. (b) Fibra corta de abacá de 10 mm dispuesta aleatoriamente. (c) Fibra continua de abacá orientada longitudinalmente. (d) Tejido plano de abacá. (e) Tejido sarga de abacá.	70
Figura 3.4. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster de reforzados con: (a) Mat de fibra de vidrio. (b) Fibra corta de abacá de 10 mm dispuesta aleatoriamente. (c)	

	Fibra continua de abacá orientada longitudinalmente. (d) Tejido plano de abacá. (e) Tejido sarga de abacá.	71
Figura 3.5.	Esfuerzo máximo a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster con 15 y 20 vol% de fibra de vidrio en forma de mat.	73
Figura 3.6.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.	74
Figura 3.7.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.	75
Figura 3.8.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.	76
Figura 3.9.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.	77
Figura 3.10.	Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con el 15 y 20 vol% de fibra de vidrio.	79
Figura 3.11.	Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.	80
Figura 3.12.	Porcentaje de deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.	81
Figura 3.13.	Porcentaje de deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.	81
Figura 3.14.	Porcentaje de deformación a la ruptura de los materiales compuestos de matriz poliéster, reforzados con tejido sarga de abacá en función de la fracción volumétrica.	82
Figura 3.15.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.	83
Figura 3.16.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.	84

Figura 3.17. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra de abacá uniaxial orientada longitudinalmente.	85
Figura 3.18. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.	86
Figura 3.19. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.	87
Figura 3.20. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.	90
Figura 3.21. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.	91
Figura 3.22. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá.	91
Figura 3.23. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.	92
Figura 3.24. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.	92
Figura 3.25. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción (a) Fibras de vidrio y abacá. (b) Mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio. (c) Formulaciones del compuesto híbrido reforzado con fibra continua de abacá y fibra de vidrio.	97
Figura 3.26. Fractura observada en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.	98
Figura 3.27. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos	

- híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá. 99
- Figura 3.28. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio..... 101
- Figura 3.29. Fractura observada en probetas ensayadas a flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá. 102
- Figura 3.30. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a flexión de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá. 102
- Figura 3.31. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción (a) Fibras de vidrio y abacá. (b) Mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio. (c) Formulaciones del compuesto híbrido reforzado con fibra continua de abacá y fibra de vidrio..... 105
- Figura 3.32. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá. 106
- Figura 3.33. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de

	longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	106
Figura 3.34.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	108
Figura 3.35.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	109
Figura 3.36.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	111
Figura 3.37.	Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	113
Figura 3.38.	Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	113
Figura 3.39.	Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	114
Figura 3.40.	Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	114

Figura 3.41. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	115
Figura 3.42. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	117
Figura 3.43. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	118
Figura 3.44. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	119
Figura 3.45. Propiedades mecánicas a tracción de las mejores formulaciones de cada configuración de abacá. (a) Esfuerzo máximo. (b) Deformación a la ruptura. (c) Módulo de elasticidad.	122
Figura 3.46. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	124
Figura 3.47. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	124
Figura 3.48. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las	

proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	125
Figura 3.49. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.	125
Figura 3.50. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio.....	127
Figura 3.51. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a flexión de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.	128
Figura 3.52. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.....	128
Figura 3.53. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.....	130
Figura 3.54. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	131
Figura 3.55. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	133

Figura 3.56. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	134
Figura 3.57. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	135
Figura 3.58. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	135
Figura 3.59. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	136
Figura 3.60. Regiones de la curva esfuerzo-deformación en las cuales se calcularon los módulos de a la flexión y de trabajo.	137
Figura 3.61. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	138
Figura 3.62. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	139
Figura 3.63. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	141
Figura 3.64. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	142
Figura 3.65. Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud	

	dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	143
Figura 3.66.	Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	145
Figura 3.67.	Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	146
Figura 3.68.	Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.	147
Figura 3.69.	Esfuerzo máximo a la flexión de las mejores formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.	149
Figura 3.70.	(a) Módulo a la flexión. (b) Modulo de trabajo de las mejores formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.	150
Figura 3.71.	Fotografías de las probetas después del ensayo. (a) Resina poliéster. (b) Material compuesto reforzado con mat de fibra de vidrio. (c) Compuesto híbrido reforzado con fibra longitudinal de abacá y mat de fibra de vidrio.	152
Figura 3.72.	Esfuerzo máximo a la tracción específico vs. módulo de elasticidad específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos.	153
Figura 3.73.	Esfuerzo máximo a la flexión específico vs. módulo a la flexión específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos.	154
Figura 3.74.	Esquema y dimensiones del prototipo de la patineta.	163
Figura 3.75.	(a) Primer prototipo. (b) Modelo original. (c) Segundo prototipo. ..	165
Figura 3.76.	Esfuerzo máximo a la tracción del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.	166
Figura 3.77.	Deformación del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.	167
Figura 3.78.	Módulo de elasticidad del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.	167

Figura 3.79. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de la madera contrachapada y del material compuesto híbrido.	168
Figura 3.80. Zona de fractura de las probetas ensayadas a tracción. (a) Compuesto híbrido del 15 vol%. (b) Compuesto híbrido del 20 vol%. (c) Prototipo de compuesto híbrido. (d) Madera contrachapada.	170
Figura 3.81. Esfuerzo máximo a la flexión del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.	171
Figura 3.82. Deformación del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.....	171
Figura 3.83. Módulo a la flexión y de trabajo del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.	172
Figura 3.84. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de la madera contrachapada y del material compuesto híbrido.....	173
Figura 3.85. Zona de fractura de las probetas ensayadas a flexión. (a) Compuesto híbrido del 15 vol%. (b) Compuesto híbrido del 20 vol%. (c) Prototipo de compuesto híbrido. (d) Madera contrachapa.	175
Figura 3.86. Superficies antes y después del ensayo. (a) Primer prototipo. (b) Segundo prototipo.....	176
Figura 3.87. Mecanismo de unión entre el tablero y las ruedas.	177

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1.	Propiedades de materiales compuestos de matrices termoestables reforzadas con fibra de vidrio. [Wallenberger, Bingham, 2010].....	3
Tabla 1.2.	Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con varios tipos de fibras. [Chand, 2008; Smith 2004].....	4
Tabla 1.3.	Propiedades mecánicas y físicas de varios tipos de resinas poliéster. [Hollaway, 1994].....	7
Tabla 1.4.	Propiedades físicas y mecánicas de algunos tipos de fibra de vidrio [Wallenberger y Bingham, 2010; Miravete, 2007; Internet 1]	12
Tabla 1.5.	Propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio en distintas configuraciones y cantidades. [Hollaway, 1994].....	13
Tabla 1.6.	Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con varios tipos de fibras lignocelulósicas. [Mohanty, 2005].....	14
Tabla 1.7.	Propiedades mecánicas de distintos tipos de fibras naturales y de la fibra de vidrio. [Chand, 2008; Mohanty, 2005; Lewin, 2007; Miravete, 2007].....	15
Tabla 1.8.	Propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz poliestireno reforzado con fibra de yute con y sin tratamiento superficial. [Llop y otros; 2005].....	23
Tabla 1.9.	Propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz epoxi reforzado con fibra de banano con y sin tratamiento superficial. [Miravete; 2003]	23
Tabla 1.10.	Descripción de las investigaciones previas realizadas en el desarrollo de materiales compuestos híbridos. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009].....	26

Tabla 1.11.	Resumen de los valores de las propiedades mecánicas obtenidas. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009]	27
Tabla 1.12.	Propiedades mecánicas de materiales compuestos híbridos de distintas matrices reforzadas con varios tipos de fibras. [Chand, 2008]	27
Tabla 1.13.	Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y fibras naturales. [Maldonado y Paredes, 2010; Chand, 2005]	28
Tabla 1.14.	Presiones de moldeo utilizadas en la elaboración de distintos materiales compuestos. [Vilarim, 2003; Carvalho, 2006; Paiva, 1999]	34
Tabla 2.1.	Tipo y número de probetas elaboradas en el presente trabajo.	39
Tabla 2.2.	Propiedades de la resina poliéster ortoftálica ANDERPOL 859. Fuente Poliquim.	43
Tabla 2.3.	Adaptaciones realizadas al Foulard Ernst Benz LEV 5007 2R. [Pontón, 2009]	46
Tabla 2.4.	Velocidad y espacio entre puntos para el ensayo de flexión de probetas del material del prototipo.	62
Tabla 3.1.	Propiedades mecánicas a tracción y eficiencia del refuerzo de distintos materiales compuestos obtenidos en la determinación de la mejor fracción volumétrica.....	68
Tabla 3.2.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.....	73
Tabla 3.3.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.....	74
Tabla 3.4.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.	75
Tabla 3.5.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.....	77

Tabla 3.6.	Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.....	78
Tabla 3.7.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.....	83
Tabla 3.8.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.....	84
Tabla 3.9.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.	86
Tabla 3.10.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.	87
Tabla 3.11.	Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.....	88
Tabla 3.12.	Fracción volumétrica nominal y real, y densidad de los materiales compuestos utilizados en los ensayos preliminares.	89
Tabla 3.13.	Propiedades mecánicas a tracción alcanzadas por las diferentes formulaciones de los materiales compuestos con 20 vol% de refuerzo híbrido.	95
Tabla 3.14.	Valores promedio de las propiedades mecánicas a flexión alcanzadas por las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá de los materiales compuestos híbridos.....	100
Tabla 3.15.	Propiedades mecánicas a tracción alcanzadas por las diferentes formulaciones de los materiales compuestos con 20 vol% de refuerzo híbrido.	103
Tabla 3.16.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud y fibra de vidrio.	107
Tabla 3.17.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá orientada longitudinalmente y fibra de vidrio.....	108

Tabla 3.18.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido plano de abacá y fibra de vidrio.....	110
Tabla 3.19.	Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido sarga de abacá y fibra de vidrio.....	112
Tabla 3.20.	Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.....	116
Tabla 3.21.	Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.	117
Tabla 3.22.	Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.....	119
Tabla 3.23.	Módulo de elasticidad de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.....	120
Tabla 3.24.	Fracción volumétrica nominal y real, y densidad de los materiales compuestos híbridos.....	123
Tabla 3.25.	Valores promedio de las propiedades mecánicas a flexión alcanzadas por las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá de los materiales compuestos híbridos.....	126
Tabla 3.26.	Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.....	129
Tabla 3.27.	Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.	130
Tabla 3.28.	Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.....	132

Tabla 3.29.	Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.....	133
Tabla 3.30.	Módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.....	138
Tabla 3.31.	Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.....	140
Tabla 3.32.	Módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.....	141
Tabla 3.33.	Módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.....	142
Tabla 3.34.	Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.....	144
Tabla 3.35.	Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.....	145
Tabla 3.36.	Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.....	146
Tabla 3.37.	Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.....	148
Tabla 3.38.	Resumen de los resultados de los materiales ensayados a impacto.....	151
Tabla 3.39.	Comparación de resultados de las propiedades mecánicas de estudios realizados con el compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con fibra de abacá y vidrio. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009].....	155

Tabla 3.40.	Comparación de las propiedades mecánicas de materiales compuestos híbridos de distintas matrices reforzadas con varios tipos de fibras con el compuesto híbrido de matriz poliéster reforzado con fibra de abacá y vidrio. [Chand, 2008]	156
Tabla 3.41.	Comparación de propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y fibras naturales con el compuesto reforzado con fibra de abacá y vidrio [Maldonado y Paredes, 2010; Chand, 2005].....	157
Tabla 3.42.	Valoración de los criterios de selección.....	158
Tabla 3.43.	Evaluación del peso específico de la facilidad de moldeo.....	159
Tabla 3.44.	Evaluación del peso específico del trabajo de post maquinado. ...	159
Tabla 3.45.	Evaluación del peso específico de la funcionalidad.....	159
Tabla 3.46.	Evaluación del peso específico de la funcionalidad.....	160
Tabla 3.47.	Propiedades mecánicas de la fracción volumétrica del 15%.....	161
Tabla 3.48.	Dimensiones establecidas en catálogos de distintas marcas fabricantes de tableros de patinetas. [Internet 6; Internet 7; Internet 8].....	162
Tabla 3.49.	Dimensiones del prototipo y del modelo original.	163
Tabla 3.50.	Resumen de las propiedades de los ensayos de tracción para la madera contrachapada y el compuesto híbrido.....	168
Tabla 3.51.	Resumen de propiedades mecánicas a tracción de las fracciones volumétricas del 15 vol%, 20 vol% y del prototipo.	169
Tabla 3.52.	Resumen de las propiedades de los ensayos de flexión para la madera contrachapada y el compuesto híbrido.	173
Tabla 3.53.	Resumen de propiedades mecánicas a flexión de probetas formuladas con las fracciones volumétricas del 15 vol%, 20 vol% y del prototipo.....	174
Tabla 3.54.	Costos de fabricación del prototipo de la patineta.....	178

SIMBOLOGÍA

USD	dólares de los Estados Unidos de América
SMC	lámina de material de moldeo
BMC	compuesto de moldeo a granel
N	velocidad de ensayo
z	constante de tasa de aplicación de carga
L	espacio entre apoyos de ensayo
d	espesor del espécimen de ensayo
h_o	altura mínima en la cual ocurre la primera falla
d_h	variación de altura
h	altura media de impacto para producir la falla
m	masa del dardo
S_h	desviación estándar
S_h	desviación estándar de la altura de impacto
E	energía absorbida por la probeta
N_o	número de probetas que no fallaron
$N_g = N$	número de probetas que fallaron
A	sumatoria del número de fallas por la posición de falla
B	sumatoria del número de fallas por la posición de falla al cuadrado
S_{mfe}	desviación estándar de la energía de falla
m_{fibra}	masa de fibra
X_{global}	fracción volumétrica global
V	volumen de la probeta
ρ_{fibra}	densidad de la fibra
$x_{parcial}$	fracción volumétrica parcial
σ	esfuerzo máximo
F	fuerza
A	área promedio
ε	deformación unitaria
δ	deflexión
L	longitud inicial de ensayo
P_c	Propiedad de del compuesto
P_f	Propiedad de de la fibra
v_f	fracción volumétrica de fibra
K	eficiencia del refuerzo
P_m	propiedad de la matriz
v_m	fracción volumétrica de la matriz
$^{\circ}C$	grado Celsius
μm	micrómetro

cm	centímetro
g	gramo
J	Joule
g/cm ³	gramo/centímetro cúbico
g/cm ²	gramo/centímetro cuadrado
GPa	gigapascal
kg/m ³	kilogramo/metro cúbico
MPa	megapascal
psi	
pie.lb/pulg	pie.libra/pulgada
Å	angstron
m	metro
m/s	metro/segundo
mm	milímetro
mm/min	milimetro/minuto
Pa.s	Pascal.segundo
vol%	fracción volumétrica
25A/75V	25% de fibra de abacá y 75% de mat de fibra de vidrio
50A/50V	50% de fibra de abacá y 50% de mat de fibra de vidrio
75A/25V	75% de fibra de abacá y 25% de mat de fibra de vidrio
FV	mat de fibra de vidrio
FCA	fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente
FLA	fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá
TPA	tejido plano de abacá
TSA	tejido sarga de abacá

RESUMEN

Las fibras naturales y sintéticas son tradicionalmente utilizadas como refuerzos de materiales compuestos de matriz polimérica. La inclusión de fibras naturales se debe fundamentalmente a la creciente preocupación en todo el mundo por la preservación del medio ambiente y el uso de materias primas renovables. Las fibras sintéticas tienen excelentes propiedades mecánicas y se pueden obtener compuestos con altos porcentajes volumétricos. Una alternativa que permite explotar las ventajas de los dos tipos de fibras es el uso de refuerzos híbridos.

En este trabajo se obtuvieron y caracterizaron mecánicamente materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibras de vidrio y abacá. Inicialmente se formularon dos tipos de material compuesto, el uno reforzado con mantas de fibra corta de vidrio (mats) y el otro con fibra de abacá. La fibra de abacá se usó en cuatro configuraciones distintas: fibra corta de 10 mm de longitud, fibra continua unidireccional, tejido plano y tejido sarga. Las fracciones volumétricas del refuerzo que se consideraron fueron 0,15 y 0,2. Estos materiales se usaron para fabricar probetas que posteriormente se ensayaron a tracción, para determinar la fracción volumétrica que permitía obtener las mejores propiedades.

Posteriormente se obtuvieron compuestos híbridos utilizando una fracción volumétrica de 0,2, la cual resultó en las mejores propiedades. Durante la fabricación de estos materiales se tomaron en cuenta dos variables: la configuración de la fibra de abacá, en los mismos arreglos usados en los ensayos preliminares, y la fracción volumétrica del refuerzo híbrido. Dentro de este refuerzo se examinaron porcentajes de fibra de vidrio y abacá en proporciones de 25-75%, 50-50% y 75-25%, respectivamente.

Los materiales resultantes se caracterizaron mediante ensayos de tracción y flexión. La formulación con la mejor combinación de propiedades fue la de 75% de fibra continua unidireccional de abacá y 25% de fibra de vidrio. La resistencia a la tracción y módulo de elasticidad del material fueron de aproximadamente 138 y

4473 MPa, que corresponden a un incremento del 270 y 150% respecto a la matriz. El esfuerzo y el módulo a la flexión fueron de 127 y 5091 MPa, que corresponden a un incremento del 113 y 122%, respecto a la matriz. La resistencia al impacto resultó 614% mayor que la del compuesto de fibra de vidrio.

Finalmente se fabricó un prototipo de una patineta y se comparó su desempeño con el de otra patineta disponible en el mercado mediante ensayos funcionales, que incluyeron ensayos de tracción y flexión. El modelo desarrollado con el compuesto híbrido fue superior al tradicional en un 96% en cuanto a la resistencia a la tracción, 109% en el módulo de elasticidad, 50% en la resistencia a la flexión pero mostró un decremento del 9% en el módulo a la flexión.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se obtienen materiales compuestos híbridos de fibra de abacá y vidrio de matriz poliéster formulados al variar la fracción volumétrica y configuración del refuerzo. Se determina el compuesto con la mejor combinación de propiedades, con el cual se elabora un prototipo de un producto existente en el mercado y se evalúa 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.

En el primer capítulo, se revisa la bibliografía sobre los temas que intervienen en este proyecto de investigación. Se presentan las características y propiedades de los materiales compuestos de matriz termoestable, compuestos lignocelulósicos, la fibra de abacá, compuestos híbridos y sus métodos de procesamiento, finalmente se listan los objetivos y alcance establecidos para el desarrollo del presente.

En el segundo capítulo se listan las características de los materiales empleados para la obtención de los compuestos híbridos y los equipos utilizados, describiendo su uso y especificaciones. Seguidamente se presenta la metodología experimental, la cual se dividió en tres etapas que fueron: ensayos preliminares, la formulación del compuesto híbrido y la caracterización mecánica detallando los ensayos realizados. Además se describen las técnicas utilizadas a lo largo del desarrollo experimental.

En el tercer capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en el trabajo experimental. Se exponen los resultados de los ensayos preliminares concernientes a la selección del tipo de molde y la presión de moldeo adecuada, así como también la determinación de la mejor fracción volumétrica de refuerzo híbrido. La caracterización mecánica del material compuesto híbrido fue realizada mediante ensayos de tracción y flexión. Con base en estos resultados se escogió la formulación con la mejor combinación de propiedades, con la que se elaboró

probetas para ensayos de impacto además de un prototipo, cuyo desempeño se evaluó mediante ensayos mecánicos y funcionales.

En el cuarto capítulo se dan las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas en el procedimiento experimental, y se señala además el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto.

CAPÍTULO 1

COMPUESTOS HÍBRIDOS

En este primer capítulo se revisa la bibliografía que trata sobre los temas que intervienen en este proyecto de investigación. Se presentan las características y propiedades de los materiales compuestos de matriz termoestable, compuestos lignocelulósicos, la fibra de abacá, compuestos híbridos y sus métodos de procesamiento, así como también, se detallan algunas características de varios procesos de fabricación y operaciones de maquinado. Finalmente se listan los objetivos y alcance establecidos para el desarrollo del presente trabajo.

1.1. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE

La necesidad de obtener materiales con combinaciones de propiedades que no se encuentran en los existentes en la naturaleza impulsa a combinar materiales para obtener materiales compuestos. Un material compuesto se forma cuando dos o más materiales se combinan, de manera que las propiedades de los compuestos sean diferentes y por lo general mejores, que las de los constituyentes individuales.

Los materiales compuestos están formados por medios continuos y discontinuos. El medio continuo se denomina matriz. El medio discontinuo, denominado refuerzo, es más fuerte y resistente. Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los materiales que lo constituyen, de su distribución e interacción. [Mahmood, 1991; Barghoorn, 1998]

Los materiales compuestos de matriz polimérica se dividen en compuestos: termoplásticos, termoestables y elastómeros. El presente trabajo de investigación se centra en los materiales compuestos de matriz termoestable, y por ello solo se profundizará en el estudio de los mismos.

En los polímeros termoestables, las resinas líquidas se convierten en sólidos duros y frágiles con enlaces covalentes, que llevan a la formación de una red tridimensional de átomos de carbono que forman un sólido rígido. Existen además átomos de nitrógeno, oxígeno, azufre u otros átomos formando parte de la red estructural. Las propiedades mecánicas dependen de las unidades moleculares que forman la red, y de la extensión y densidad de los enlaces cruzados. Lo primero está determinado por los productos químicos iniciales usados y lo segundo por el control de los procesos de unión reticular que están involucrados en el curado.

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.

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. [Hull, 2003; Smith, 2004]

Cabe señalar que los materiales compuestos se pueden reforzar utilizando materiales naturales y sintéticos. Los mismos que pueden tener diferentes formas tales como: fibras cortas, fibras continuas, láminas, tejidos, no tejidos, partículas. Para cada tipo de refuerzo se presentan ventajas y desventajas, dependiendo del proceso de fabricación, la tasa de producción, costos y requisitos de una determinada aplicación. Además, cada tipo de refuerzo otorga diferentes propiedades al material compuesto, las mismas que se resumen en la tabla A1 del anexo 1. [Mazumdar, 2002]

Entre los refuerzos más utilizados están las fibras. Su ventaja radica en la facilidad de procesamiento que presentan y en que permiten obtener mejores propiedades mecánicas. Comúnmente las fibras más utilizadas con matrices termoestables son las fibras de vidrio.

Una gran variedad de resinas y sistemas de reacción están disponibles para aplicaciones en sectores como el automotriz, naval, construcción, deportivo, entre otros. En la tabla 1.1 se comparan varias propiedades de materiales compuestos de diferentes matrices termoestables reforzadas con fibra de vidrio. [Wallenberger, Bingham, 2010]

Tabla 1.1. Propiedades de materiales compuestos de matrices termoestables reforzadas con fibra de vidrio. [Wallenberger, Bingham, 2010]

Resina	Proceso	Propiedades del material compuesto			
		Mecánicas	Eléctricas	Resistencia al calor	Resistencia química
Poliéster	a, b, c, d, e	██████	██████	██████	██████
Epoxi	a, b, c, e	██████	██████	██████	██████
Vinilíster	a, b, c, e	██████	██████	██████	██████
Fenólico	a, b, c, d, e	██████	██████	██████	██████
Silicona	e	██████	██████	██████	██████
Poliuretano	b, c	██████	██████	██████	██████
Poliamida	e	██████	██████	██████	██████

- a: laminado manual/aspersión.
 b: moldeo por transferencia de resina.
 c: pultrusión/bobinado de filamentos.
 d: laminación continua.
 e: compuestos de moldeo/pre impregnados.

Una alternativa al uso de fibra de vidrio consiste en emplear fibras naturales. Estas fibras, además de estar ampliamente disponibles en varias formas, representan materias primas renovables. En la tabla 1.2 se muestran algunas de las propiedades de materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con varios tipos de fibras.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con varios tipos de fibras. [Chand, 2008; Smith 2004]

Material compuesto	Fracción de refuerzo	Esfuerzo máximo a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Densidad [g/cm ³]
Sisal-Epoxi	0,3 en volumen	12,37	133,3	0,99
Yute-Epoxi	0,329 en peso	104	15	1,15
Vidrio-Fenólico	-	3,47-124,1	-	1,34 – 1,45
Celulosa-Melamina	-	3,47-62.05	-	1,45 – 1,52

1.1.1. 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 difuncionales con un alcohol difuncional. Los ácidos utilizados incluyen maleico, fumárico, ftálico y tereftálico. Los alcoholes son glicol etileno, glicol de propileno, y el 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.

La resina se solidifica mediante una reacción química inducida por un agente externo. A este proceso se denomina curado. Para iniciar el curado se necesita la presencia de un catalizador (iniciador) y un acelerante. El acelerador promueve la descomposición del iniciador por la ruptura del enlace de peróxido para formar dos radicales libres. Cada uno de estos retiene un electrón del par de electrones roto y es una especie altamente reactiva. Entonces se produce una reacción en cadena, como radicales libres de peróxido de captura de electrones a partir del monómero de vinilo, creando otro radical libre que reacciona con la instauración de la cadena de poliéster.

El curado de una resina poliéster se inicia tan pronto como se añade el iniciador. 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 que se produzca adecuadamente el proceso de curado.

La reacción que se produce es una reacción exotérmica que puede alcanzar una temperatura de 160°C aproximadamente. Durante este proceso se presentan tres etapas:

- En la gelificación, la resina pasa de un estado líquido viscoso a un gel blando.
- En el endurecimiento, la resina pasa de un gel blando a sólido.
- En la maduración, la resina adquiere todas sus propiedades mecánicas y químicas.

Las dos primeras etapas son relativamente cortas, al contrario de la última que puede tardar varias horas si se utiliza una estufa calefactora o varios días si se lo realiza a temperatura ambiente. [Maldonado y Paredes, 2010; Mazumdar, 2002]

Las características de las resinas de poliéster se pueden variar mediante la alteración de las proporciones de sus componentes químicos durante el proceso de producción. Como se mencionó anteriormente, el punto de partida para la obtención de un sólido de poliéster es la utilización de ácidos orgánicos (saturados e insaturados) y alcoholes. Los grupos éster se forman a través de la eliminación de agua entre los ácidos y los glicoles, resultando en una molécula de cadena larga conformada por unidades de ácido y glicol alternadas. El control cuidadoso de la proporción de ácidos saturados a ácidos insaturados resulta en la incorporación de sitios de entrecruzamiento (insaturación, o enlaces dobles carbono-carbono) a intervalos regulares a lo largo de la cadena.

La variación de la densidad de las zonas insaturadas en la cadena polimérica tiene efectos fundamentales en la estructura de curado de la resina y sus propiedades finales, aunque el impacto total de la alta insaturación solo se logra

con alta temperatura después del curado, cuando la reacción de entrecruzamiento va a terminar. Considerando que los niveles de ácido insaturado juegan un papel importante en la determinación de la densidad de entrecruzamiento de una resina poliéster cuando se hace reaccionar con monómeros (tales como estireno, MMA, vinil tolueno y estireno, alfa-metil), otras propiedades como la resistencia química y resistencia al fuego se verán influenciadas por el ácido saturado y el glicol utilizado. Por otro lado, los poliésteres generalmente se clasifican según el material utilizado en su fabricación (ortoftálico, isoftálico, ISO-NPG, bisfenol A). Cabe señalar, que la densidad de reticulación tiene una marcada influencia en las propiedades; este efecto es más notable cuando se compara la misma resina curada en frío y después de completado el curado.

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

En la tabla 1.3 se muestran las propiedades mecánicas y físicas de varios tipos de resinas poliéster. [Hollaway, 1994]

De los resultados expuestos se puede notar que las propiedades mecánicas mejoran cuando la resina poliéster está completamente curada. La resistencia a la tracción mejoró aproximadamente en un 6% y el módulo de elasticidad en un 20%. La resistencia a la compresión es muy superior a la resistencia a la tracción, esto se debe a que los procesos de deformación plástica manifiestos a compresión no se producen a tracción por la rotura prematura que está relacionada con las grietas en el material y en las superficies de las muestras de ensayo. [Hull, 2003]

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas y físicas de varios tipos de resinas poliéster. [Hollaway, 1994]

Tipo de poliéster	Ortoftálico de reactividad				
	Alta	Mediana		Baja	
		Completado el curado	16 horas a 40°C o 28 días a temperatura ambiente	Completado el curado	16 horas a 40°C o 28 días a temperatura ambiente
Resistencia a la tracción [MPa]	54	68	64	60	60
Módulo de elasticidad [GPa]	3,6	3,6	3	3,8	3,2
Deformación [%]	2	2,4	4,5	2	3
Resistencia a la compresión [MPa]	130	134	-	137	-
Módulo a la compresión [GPa]	3,7	3,7	-	4,4	-
Resistencia a la flexión [MPa]	136	113	-	127	-
Módulo a la flexión [GPa]	3,9	3,7	-	4,2	-
Máxima temperatura de uso [°C]	110	75	57	65	55
Dureza Barcol	48	46	42	45	43
Gravedad específica	1,21	1,23	-	1,22	-
Adsorción de agua durante 24 horas [mg]	30	20	16	16	15

En la figura 1.1 se muestra la curva esfuerzo-deformación de la resina poliéster. Se observa que la resina tiene un comportamiento frágil, puesto la curva esfuerzo-deformación es lineal y no posee zona de deformación plástica. Cabe señalar que las probetas de resina poliéster fueron ensayadas transcurridos 15 días desde su elaboración.

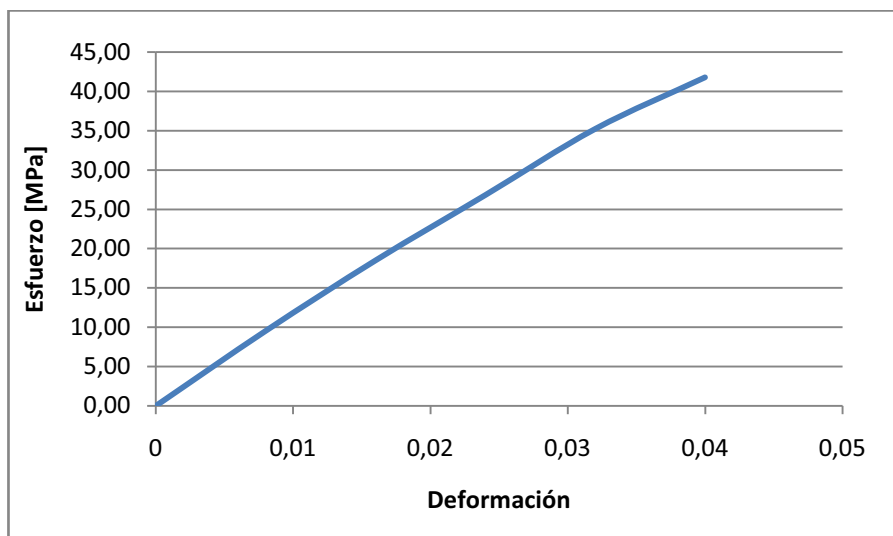


Figura 1.1. Curva esfuerzo-deformación de la resina poliéster.

La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de la resina poliéster utilizada en el presente proyecto de investigación es de 42 y 1051 MPa, respectivamente. Mientras que su deformación es del 4,5% y la de las fibras de abacá y vidrio son del 3,68% y 4,5%, respectivamente. [Páez, 2007; Internet 1]. Por esto, se espera que la fibra de abacá pueda rigidizar el compuesto híbrido, especialmente cuando las fibras estén dispuestas en dirección de la carga de ensayo.

1.1.2. FIBRA DE VIDRIO

Las fibras de vidrio se usan para reforzar matrices poliméricas y formar así materiales compuestos estructurales y productos de moldeo. Las principales ventajas de la fibra de vidrio son: su bajo costo, alta resistencia a la tracción y alta resistencia química. Las desventajas radican en el relativamente bajo módulo de elasticidad, alta densidad, sensibilidad a la abrasión y alta dureza, que causa desgaste en herramientas de corte. Principalmente las fibras utilizadas en materiales compuestos son fabricadas con vidrios E (eléctricos) y vidrios S (de alta resistencia). Los últimos poseen una mejor relación resistencia-peso y son más costosos que los tipos E. [Smith, 2004; Mallick, 1993]

1.1.2.1. Proceso de fabricación de la fibra de vidrio

Varios son los procedimientos que conducen a la producción de fibra de vidrio pero, en general, el principio sobre el cual se basan es siempre el mismo: el estiramiento a muy alta temperatura, por tracción mecánica o por acción de fluidos en movimiento, de un filamento o una mecha de vidrio fundido y su inmediata solidificación. En este proceso se distinguen las siguientes etapas: [Miravete, 2007]

- Composición-Fusión
- Fibrado
- Ensimado
- Bobinado
- Secado

Una vez obtenidas las fibras, a partir de ellas se pueden generar varios productos. Entre ellos se encuentran: [Mallick, 1993; Peters, 1998; Hearle, 2001]

Las mechas de fibra de vidrio, constituidas por un conjunto de filamentos paralelos en un número de 204 o más. A menudo la presentación comercial de este producto son rollos y se usan en procesos de bobinado de filamentos. Las mechas también son picadas en longitudes cortas para utilizarlas en procesos de aspersion.

Los hilados de fibra de vidrio tienen similitud con las mechas, la diferencia radica en que en los hilados se incorpora un giro en los filamentos. Otra presentación de la fibra de vidrio es la fibra picada, que es producida por el corte de hilados en longitudes que varían entre 1,5 a 50 mm dependiendo la aplicación.

En el tejido de fibras una serie de mechas se tejen en distintas formas. La finalidad del tejido es que las fibras estén orientadas en la misma dirección de las cargas aplicadas al material. Se fabrican en pesos por unidad de área que van desde 400-1400 g/m² y con espesores de 0,7 a 1,5 mm. El tejido se usa en materiales compuestos que requieren una rápida acumulación de espesor en

áreas relativamente grandes. Este producto se utiliza generalmente en procesos de laminado manual.

Los mats de fibra de vidrio son materiales no tejidos, donde las hebras de fibra de vidrio se cortan en longitudes de 2 a 5 cm y son uniformemente distribuidas al azar sobre un plano horizontal, unidas con algún tipo de aglomerante. Los mats se fabrican en pesos por unidad de área que varían entre 2,6 y 12 g/m². En la figura 1.2 se muestran las distintas presentaciones comerciales de la fibra de vidrio, tales como: fibra corta, mats, tejidos, hilados y mechas. En cuanto a los tejidos, estos pueden ser fabricados en distintas configuraciones, por ejemplo el de tipo plano, sarga, satín, triaxial, canasta, entre otros.

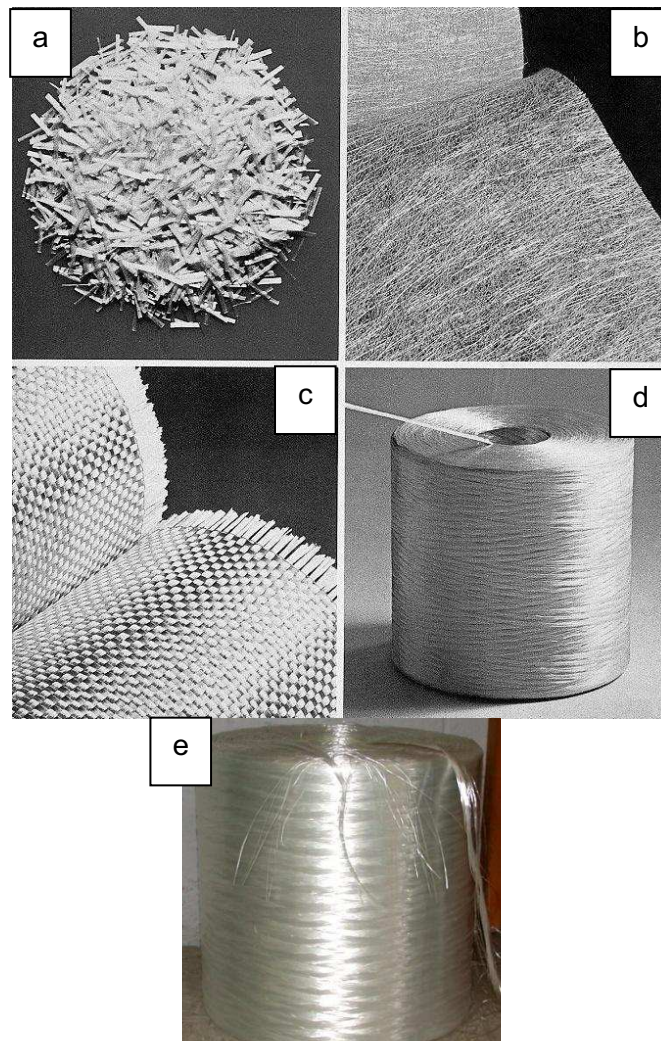


Figura 1.2. Presentaciones comerciales de la fibra de vidrio (a) Fibra corta. (b) Mats. (c) Tejidos. (d) Hilados. (e) Mechas. [Hearle, 2001; Internet 2]

1.1.2.2. Propiedades de la fibra de vidrio

La fibra de vidrio es la más utilizada como refuerzo en materiales compuestos, debido a su reducido precio y versatilidad en comparación a otras fibras sintéticas, a pesar de que presenta menor resistencia y módulo a la tracción. Por otro lado, la fibra de vidrio tiene mayor elongación. [Smith, 2004]

Las principales características de la fibra de vidrio son: [Miravete, 2007; Smith, 2004]

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Características eléctricas adecuadas, es un buen aislante eléctrico incluso en espesores reducidos, además presentan una alta permeabilidad dieléctrica.
- Incombustibilidad, al ser un material mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza, no propaga las llamas ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con la mayoría de matrices orgánicas, la capacidad de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confiere la posibilidad de asociarse con numerosas resinas sintéticas, así como ciertas matrices minerales, tales como el yeso y el cemento.
- Alta relación peso-resistencia.
- Facilidad de fabricación y costo relativamente bajo.

En la tabla 1.4 se resumen los valores de las propiedades físicas y mecánicas de algunos tipos de fibra de vidrio.

Tabla 1.4. Propiedades físicas y mecánicas de algunos tipos de fibra de vidrio [Wallenberger y Bingham, 2010; Miravete, 2007; Internet 1]

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de filamento [μm]	5-13	10-20	10	10
Densidad [g/cm^3]	2,5	2,54	2,48	2,59
Módulo de elasticidad [GPa]	69	72,5	86	85
Resistencia a la tracción [GPa]	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Elongación a la rotura [%]	4,3	4,5	-	5,2

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de los materiales compuestos dependen de los materiales que se empleen, su configuración, disposición, cantidades relativas y la forma en la que se unen en la interfaz. La tabla 1.5 que se presenta a continuación, ilustra la variación de propiedades mecánicas en diferentes tipos de compuestos reforzados con fibra de vidrio.

De los resultados expuestos se puede notar que conforme aumenta la fracción volumétrica de refuerzo las propiedades incrementan, la configuración del refuerzo influye en el comportamiento del material. La combinación de mats y tejidos y fibra unidireccional de vidrio presenta las propiedades mecánicas más elevadas cuando la carga se aplica en dirección de la fibra, lo que contrasta cuando la carga se aplica transversalmente a la dirección de las fibras de refuerzo, por lo que el material es anisotrópico.

El tejido satín presenta mejores propiedades, la ventaja de esta configuración radica en que el material pueda resistir estados de carga biaxiales. Al igual que con el resto de configuraciones el objetivo de combinar distintas disposiciones de fibra es convertir al compuesto en un material isotrópico. Las bajas propiedades obtenidas con el refuerzo de mat de fibra de vidrio se deben a que las fibras están dispuestas aleatoriamente por lo que pocas fibras estarán en la dirección de aplicación de la carga.

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio en distintas configuraciones y cantidades. [Hollaway, 1994]

Fibra de vidrio de refuerzo	CSM	WR	Tejido satín	UD-CSM		WR-CSM	SMC
Resina	Orto poliéster	Iso poliéster	Iso poliéster	Iso poliéster		Iso poliéster	Iso poliéster
Curado	16 h 40°C	16 h 40°C	28 días temp. ambiente	16 h 60°C		16 h 40°C	Curado en caliente
Fracción volumétrica de fibra	0,17	0,32	0,37	-		-	24% en peso
R:F proporción (en peso)	2,33 : 1	1 : 1	0,81 : 1	1,3 : 1		1,16 : 1	-
Dirección del refuerzo	-	0°/90°	0°/90°	0°	90°	0°/90°	-
Propiedad							
Gravedad específica	1,46	1,70	1,70	-		-	1,87
Resistencia a la tracción (MPa)	110	220	260	300	25	180	70
Módulo de elasticidad (GPa)	8	14	17	16	7	12,2	10
Elongación a la ruptura (%)	1,6	1,7	-	2	0,8	1,8	1,4
Relación de Poisson a tracción	0,32	0,14	0,17	-		-	-
Resistencia a la compresión (MPa)	150	230	210	250	110	180	120
Módulo a la compresión (GPa)	8	15	19	-		-	-
Relación de Poisson a compresión	0,42	0,25	0,23	-		-	-
Resistencia a la flexión (MPa)	190	270	480	-		320	140
Módulo a la flexión (GPa)	7	14	17	-		11	8
Resistencia al corte (MPa)	80	90	70	-		-	70
Módulo a corte (GPa)	3	3,3	-	-		-	3,8
Resistencia al corte de una viga corta (MPa)	20	25	36	-		-	19
Esfuerzo de corte interlaminar (MPa)	5	7	-	-		7	-
Energía de impacto Charpy (kJ/m ²) (sin muesca)	-	-	-	-		-	60

SMC: Lámina de material de moldeo

CMS: Mat de hilos cortados (Chopped strand mat)

WR: Tejido de hilados de fibra de vidrio

UD: Fibra unidireccional

1.2. COMPUESTOS LIGNOCELULÓSICOS

Se conocen como compuestos lignocelulósicos a aquellos compuestos con matriz termoplástica o termoestable reforzada con fibras o partículas naturales de origen vegetal. Las fibras naturales vegetales son aquellas que se pueden extraer de las plantas. Estas fibras están constituidas principalmente por celulosa y lignina; es por eso que reciben el nombre de fibras lignocelulósicas. Los porcentajes de cada uno de los constituyentes de las fibras influyen directamente en sus propiedades mecánicas. [Barghoorn, 1998].

Las fibras vegetales son un material compuesto natural. La celulosa provee a las fibras de resistencia y estabilidad estructural, mientras que la lignina es un pegamento natural que agrupa a las fibras de celulosa. Es decir que la celulosa es el refuerzo y la lignina actúa como matriz. [Oksman, 2008; Mohanty, 2005]

El uso de las fibras naturales de origen vegetal, en particular de la madera, se presenta como resultado de la necesidad de desarrollar materiales con tecnologías que permitan obtener propiedades adecuadas con un mínimo impacto ambiental. Esto ha desembocado en un aumento de la demanda mundial de recursos naturales en lo que respecta a las fibras naturales. En 1997, aproximadamente 25 millones de toneladas métricas de fibras artificiales y cerca de 20 millones de toneladas métricas de fibras naturales fueron producidas a nivel mundial. [Barghoorn, 1998]

En la tabla 1.6 se presentan las propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con varios tipos de fibras lignocelulósicas.

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas de compuestos de matriz poliéster reforzados con varios tipos de fibras lignocelulósicas. [Mohanty, 2005]

Fibra de refuerzo	Fracción volumétrica	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]
Coco	0,09	18,61	4045	38,51
Banano	0,09	25,85	1360	52,38
	0,14	30,96	2030	61,24
Piña	0,30	43,38	-	85,81
Sisal	0,30	68,33	-	107,8

La fracción volumétrica del compuesto de fibra de coco es baja, esto se puede deber a que la fibra es corta y ondulada por lo que se aglutina y no ofrece un refuerzo efectivo, lo cual se evidencia en las bajas propiedades mecánicas. En cuanto al compuesto de fibra de banano, se puede notar que las propiedades incrementan conforme el porcentaje en volumen de refuerzo aumenta.

En la tabla 1.7 se muestra las propiedades mecánicas de distintos tipos de fibras naturales, así como también las de la fibra de vidrio.

Tabla 1.7. Propiedades mecánicas de distintos tipos de fibras naturales y de la fibra de vidrio.
[Chand, 2008; Mohanty, 2005; Lewin, 2007; Miravete, 2007]

Fibra	Esfuerzo máximo [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Cáñamo	490	3000-5000
Lino	640	2400-4000
Sisal	169	3860
Abacá	980	7200
Fibra de vidrio tipo S	4590	86000
Fibra de vidrio tipo E	3400	72500

La diferencia de las propiedades mecánicas entre las fibras sintéticas y las naturales es muy grande. En cuanto al esfuerzo máximo, la fibra de vidrio tipo E es aproximadamente 7, 5, 20 y 3 veces superior a las fibras de cáñamo, lino, sisal y abacá, respectivamente. En cuanto al módulo de elasticidad, la fibra de vidrio tipo E es superior en alrededor de 14, 18, 18 y 10 en relación a las fibras de cáñamo, lino, sisal y abacá, respectivamente.

La diferencia tan marcada entre las propiedades mecánicas de las fibras naturales y de vidrio, se debe a que estas últimas se obtienen mediante un proceso de fabricación y tienen una menor probabilidad de contener defectos. En cambio, las fibras naturales están constituidas de lignina y celulosa cuyas unidades por ejemplo no siempre siguen una orientación preferencial, ni han sufrido un estiramiento que pueda alinear sus cadenas y las haga más resistentes. Además, las bajas propiedades mecánicas de las fibras lignocelulósicas se deben a que dependen de factores como la humedad, tiempo de cosecha (madurez), variedad de la planta, que de hecho ya están comprometiendo el comportamiento mecánico y presentando una aleatoriedad en propiedades de una fibra a otra

(fibras de diferentes plantas de una misma plantación no siempre tienen propiedades repetitivas, eso no ocurre con las fibras sintéticas). [Lewin, 2007]

1.2.1. ABACÁ: CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS Y VARIEDADES

El abacá o Cáhño de Manila (*Musa textilis*) es una planta herbácea que pertenece a la familia de las Musáceas. Su apariencia es similar a la planta de banano, pero es completamente diferente en sus propiedades y usos. Es nativo de las Filipinas. En los años 40 fue introducido al Ecuador, excelente lugar para el cultivo de abacá por las condiciones climáticas de las zonas tropical y sub-tropical de las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas, Manabí, Los Ríos y Cotopaxi.

La planta de abacá tiene un tallo más delgado y espigado que su pariente más conocido, tallo que está formado por las vainas de las hojas que se van formando durante la vida del tallo denominado pseudotallo, que es donde se encuentra la fibra. Las vainas externas de color verde negruzco o rojizo negruzco, dependiendo de la variedad, tienen las fibras cortas, más gruesas y de color oscuro, que constituyen la fibra de menor calidad. Conforme se avanza hacia el interior del tallo se encuentran las vainas que tienen las fibras más largas y cuyo color va siendo más claro, hasta llegar al cilindro central en donde se vuelve a encontrar la fibra más corta pero muy blanca y que constituye la mejor calidad de fibra. [CADE; Leatham, 2000; Maldonado, 2000]

El abacá debe ser cultivado en regiones con características geográficas, ambientales y agropecuarias específicas, a fin de obtener la mejor productividad posible. Las mejores regiones para cultivar el abacá son aquellas con un clima tropical húmedo y temperaturas que varían entre los 22 – 28°C. Además, la precipitación fluvial es muy importante, se necesita de 1800 mm a 2500 mm de lluvia distribuida adecuadamente durante el año. El suelo debe ser de tipo arcilloso, que posea un buen drenaje y abundante materia orgánica. Un elemento más a considerar es la altitud, que debe ser de un máximo de 600 metros sobre el nivel del mar.

La planta de abacá tiene un ciclo de vida perenne, con un periodo de producción de 15 a 20 años. Tarda de 18 a 24 meses en producir fibra; luego de eso el producto puede ser cosechado cada 2 o 3 meses. [Leatham, 2000; Maldonado, 2000]

En cuanto a las variedades de la planta de abacá, en Filipinas se reporta la existencia de más de 40 variedades de abacá. En el Ecuador, por ser un país al que se introdujo y se adaptó el cultivo, las variedades que se producen son: [Leatham, 2000; Maldonado, 2000]

- Bungalanón (tipo negro y rojo)
- Tangongón (tipo negro, rojo, y meristemático)
- Maguindando (tipo rojo y verde)

Bungalanón

Es la variedad más común cultivada en el Ecuador. La fibra procedente de este clon es de gran calidad. Sin embargo, las plantas envejecen con mayor rapidez y el rendimiento de fibra por hectárea disminuye aceleradamente en plantaciones de más de 10 años. Cabe mencionar que en el Ecuador existen plantaciones que tienen más de 30 años y aún siguen en producción. El bungalanón es una variedad temprana, que se desarrolla en una planta pequeña, con tallos delgados y cortos; la base es de color marrón y la mayor parte es de color verde brillante. Produce fibras blancas y blandas. [Leatham, 2000; Maldonado, 2000]

Tangongón

Se caracteriza por producir una fibra común, pero fuerte. Las plantas son muy vigorosas, con tallos largos y anchos. Esta variedad es más resistente a condiciones adversas como la falta de agua y a enfermedades como el “mal de Panamá” producido por el hongo *Fusarium oxysporum f. cubense*, que puede vivir en la tierra hasta por 30 años y es considerado uno de los más destructivos del mundo porque deja inservibles las tierras para el cultivo de plantas similares al plátano y banano. Además, genera el cien por ciento de pérdida en la producción.

En la figura 1.3 se muestra una planta de abacá de la variedad Tangongón Rojo. [Leatham, 2000; Maldonado, 2000; Pontón, 2009; Cerón, 2006]

Maguindanao

Presenta un tipo de hoja más grande y fuerte, puede mostrar un tallo maduro y con flores en un tiempo tan corto como 15 meses después de que aparece el primer retoño. Produce de 15 a 20 tallos por mata, su fibra es más blanca, suave y brillante. [Páez, 2007]



Figura 1.3. Planta de abacá de la variedad Tangongón Rojo. [Pontón, 2009]

1.2.2. PROPIEDADES Y APLICACIONES DE LA FIBRA DE ABACÁ

La fibra de abacá tiene una longitud que oscila entre 1 a 2 m o más, con un diámetro de 0,01-0,28 mm. La fibra tiene forma de filamento y está compuesta por muchas fibrillas unidas entre sí por gomas naturales. Las células individuales son de forma cilíndrica miden entre 3 y 12 mm y de 6 a 46 μm de diámetro. Por otro lado la fibra de abacá es mucho más resistente a la degradación en agua salada que la mayoría de fibras vegetales. [Lewin, 2007; Gordon, 1964; Mohanty, 2005]

Las fibras de abacá son lignocelulósicas y su composición química es: 70,1% celulosa, 21,8% hemicelulosa, 0,6% pectina, 5,7% lignina. [Lewin, 2007]

La fibra de abacá tiene los siguientes usos: [FAO, 2009]

- Fabricación de papel, bolsas para té, envolturas para embutidos, papel moneda, papel para cigarrillos y papel de escritorio de alta calidad.
- Cordelería, fabricación de sogas para buques.
- Artesanías, tapicería, hamacas, sandalias, esteras, sillones, etc.

Además, la fibra de abacá puede ser tejida. En proyectos de investigación realizados en la Escuela Politécnica Nacional se han elaborado tejidos de tipo plano, sarga y satén.

En la figura 1.4 se muestran imágenes de las aplicaciones del abacá.

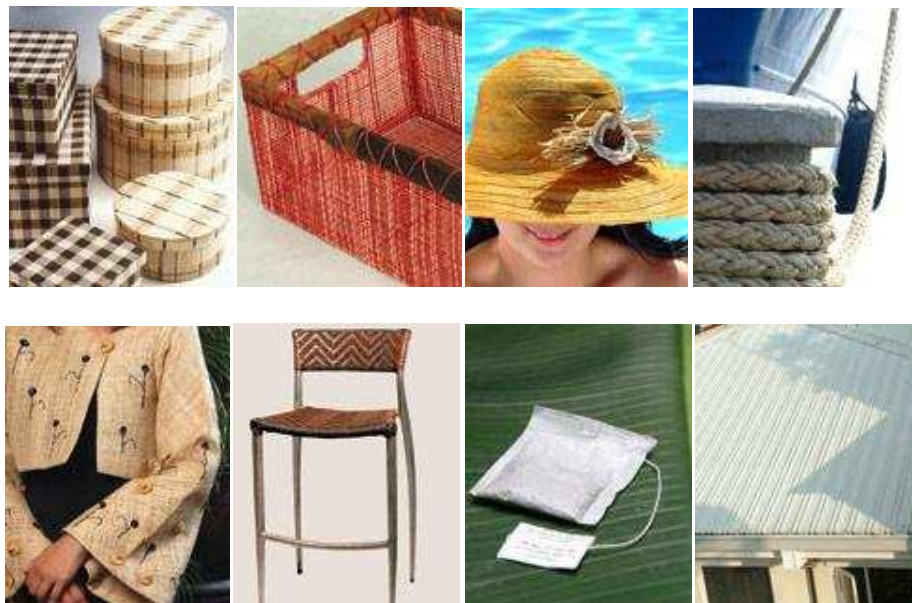


Figura 1.4. Usos de la fibra de abacá. [Internet 3]

1.3. INTERFAZ FIBRA-MATRIZ

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 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. [Hull, 2003]

La transferencia de los 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. Esta situación exige el desarrollo de estrategias para la modificación de las superficies de las fibras. [Mohanty; 2005]

La adhesión está relacionada con la facilidad de desunión y desprendimiento de las fibras de la matriz durante la propagación de la rotura. No existe una teoría única que explique este fenómeno completamente. Cada una de las teorías de adhesión es válida hasta cierto punto, dependiendo de la naturaleza de los sólidos en contacto y las condiciones de formación del sistema.

Algunas teorías son más aplicables a un tipo de uso que otras. Sin embargo, las teorías que se presentan a continuación dan una idea general sobre la formación de buena adherencia. [Hull, 2003; Mazumdar, 2002; Pizzi, 2003]

Bloqueo Mecánico

Este modelo concibe la introducción de la matriz en estado líquido en las cavidades, poros y asperezas de la superficie del refuerzo. Un aumento en la adherencia por bloqueo mecánico, se puede lograr mediante la mejora, tanto de la morfología de la superficie y de las propiedades físico-químicas de superficie de la matriz y del refuerzo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la mejora de la adherencia se puede atribuir simplemente al aumento de la rugosidad de la superficie del refuerzo. [Pizzi, 2003]

Teoría de Adsorción

Las fuerzas superficiales son generalmente designadas como secundarias o como fuerzas de Van der Waals. Para desarrollar las fuerzas de atracción molecular debe haber un contacto íntimo entre el adhesivo y la superficie del sustrato, y las superficies no deben estar a más de 5 Å de distancia. El proceso para desarrollar un contacto íntimo entre el adhesivo y el material de sustrato se conoce como adherencia de soldadura. La figura 1.5 se ilustran ejemplos de una buena y una pobre humectación.

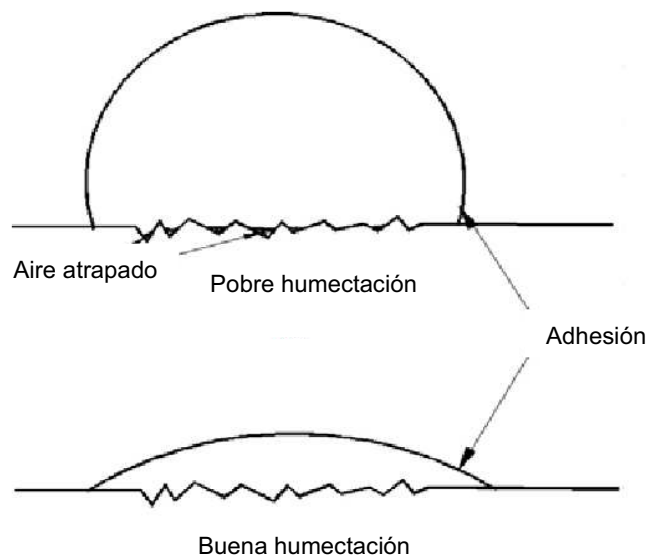


Figura 1.5. Humectación de la matriz sobre la superficie del refuerzo. [Mazumdar, 2002]

Teorías de la Electroestática y la Difusión

La teoría de la electrostática puede ser considerada como la combinación de las teorías de adsorción y mecánica. De acuerdo con esta teoría, las fuerzas electrostáticas forman una doble capa eléctrica que se forma en la interfaz del adhesivo y el sustrato. Estas fuerzas crean la resistencia contra la separación.

De acuerdo con la teoría de la difusión, la adhesión se produce debido a la interrelación de difusión de moléculas en el adhesivo y las superficies de sustrato. La clave para los procesos de difusión es que los materiales del sustrato y del adhesivo deben ser químicamente compatibles. [Mazumdar, 2002]

En las fibras sintéticas, particularmente en la fibra de vidrio, para garantizar una buena adhesión a la matriz, la superficie de la fibra se recubre con un ensimaje

que tiene como función el proporcionar una fuerte unión química entre los grupos óxido de la fibra y las moléculas de polímero de la resina. Por lo que una mejor adhesión se puede obtener con recubrimientos que presenten mejor afinidad entre la matriz y el refuerzo. [Hull, 2003]

Por otro lado, en los materiales compuestos reforzados con fibras naturales se presentan desventajas que dificultan obtener una adecuada unión entre la fibra y la matriz. La más relevante de estas, es que las fibras naturales son materiales altamente heterogéneos, tanto física como químicamente. Además, la pobre mojabilidad de las fibras las hace incompatibles con los polímeros. Así como también la absorción de humedad hace que el uso de este tipo de refuerzo sea menos atractivo para aplicaciones exteriores.

Para mitigar los efectos de las desventajas antes mencionadas, es necesario modificar la superficie de las fibras, por medio de métodos físicos o químicos. Estos tratamientos permiten mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Entre los métodos físicos comúnmente usados están el tratamiento corona, el tratamiento plasma, mercerización y el tratamiento térmico. Los métodos químicos usualmente usados son el método basado en esterificación y la inclusión de agentes de acoplamiento de silano. [Mohanty, 2005; Pickering, 2008] En investigaciones realizadas se demuestra la mejoría en las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, las mismas que fueron sometidas a tratamientos para modificar su superficie y mejorar la adhesión en el compuesto.

En el trabajo “Influencia de la modificación de las fibras sobre las características a fractura de un poliestireno reforzado con fibras de yute”, realizado por Llop, López, Vilaseca y Mutjé en la Universidad de Girona, el tratamiento dado a la fibra fue el de mercerización con hidróxido sódico al 0,5% durante cuatro horas. En la tabla 1.8 se resumen los resultados obtenidos del material compuesto reforzado con una fracción volumétrica del 0,3 con fibra de yute con y sin tratamiento, además de muestras de poliestireno.

Tabla 1.8. Propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz poliestireno reforzado con fibra de yute con y sin tratamiento superficial. [Llop y otros; 2005]

Muestra	Tenacidad a la fractura [MPa.m ^{1/2}]	Porcentaje de diferencia
Poliestireno	1,23	-
Poliestireno/Yute	2,35	91
Poliestireno/Yute tratado	2,89	135

En el estudio “Efecto de la modificación de la interfase en el comportamiento de materiales compuestos naturales”. [Miravete, 2003], se elaboró un material compuesto de matriz epoxi reforzado con fibras de banano, las cuales fueron sometidas a tres diferentes tratamientos: uno fue el de mercerización, otro con agentes de acoplamiento de silano y finalmente una combinación de los dos tratamientos anteriores. Se fabricó material compuesto con una fracción del 20% en peso de refuerzo. Se realizaron ensayos de flexión a tres puntos, de los cuales se obtuvieron los resultados que se resumen en la tabla 1.9.

Tabla 1.9. Propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz epoxi reforzado con fibra de banano con y sin tratamiento superficial. [Miravete; 2003]

	Tratamiento realizado a la fibra			
	Sin tratamiento	Mercerización	Silanización	Mercerización/ Silanización
Resistencia a la flexión [MPa]	50	62	78	112

De los resultados obtenidos se pudo notar que los tratamientos de mercerización y silanización resultan eficientes para incrementar la compatibilidad a través de la interfaz fibra de banano-matriz epoxi. Las mejores propiedades se obtuvieron con las fibras que fueron tratadas previamente con una solución alcalina. Este procedimiento permite que el silano se fije en forma más efectiva sobre la fibra, debido a la eliminación de componentes como pectina y ceras, al mismo tiempo que se altera la rugosidad superficial de la fibra. [Miravete, 2003]

1.4. COMPUESTOS HÍBRIDOS

Un material compuesto reforzado con fibras relativamente nuevo es el denominado híbrido, que se obtiene utilizando dos o más clases diferentes de fibras en una única matriz. Los compuestos híbridos han despertado el interés en aplicaciones estructurales por las siguientes razones: [Piggot, 2002; Chou, 1992]

Este tipo de material ofrece a los diseñadores la libertad de adaptar nuevos materiales, para conseguir propiedades mecánicas que con los compuestos tradicionales no se pueden conseguir.

También, se puede reducir el coste en la obtención de este tipo de materiales, al sustituir una parte de fibras costosas por fibras más baratas, sin que tenga un efecto significativo en las propiedades mecánicas. [Chou, 1992]

Por otro lado, el interés actual en utilizar fibras naturales en compuestos híbridos se debe, entre otros factores, a la creciente preocupación en todo el mundo con la preservación del medio ambiente y el uso de materia prima renovable. Existe un gran interés en la búsqueda de fibras naturales que pueden reemplazar adecuadamente las fibras sintéticas, como por ejemplo la fibra de vidrio.

En el caso de los compuestos lignocelulósicos, las propiedades mecánicas que se obtienen son relativamente bajas. Una alternativa de mejorar sus prestaciones es la de combinar el uso de fibras naturales con el de fibras sintéticas. Para este caso se tiene como ventaja la disminución significativa del peso en elementos sometidos a cargas livianas o moderadas. Debido a que las fibras naturales presentan baja densidad. Sin embargo, los principales limitantes de estas fibras son el bajo desempeño mecánico y la alta adsorción de humedad. [Freitas, 2006]

Cabe señalar que la inclusión de fibras naturales ha sido estudiado ampliamente en las últimas dos décadas, con algunas aplicaciones bien establecidas, principalmente en el campo automotriz. Sin embargo, sus aplicaciones están limitadas por las bajas propiedades mecánicas y la alta adsorción de humedad, en comparación con los compuestos con fibras sintéticas. [Barros, 2006]

Dependiendo de la disposición de las fibras los compuestos híbridos se pueden clasificar en tres grupos: [Chou, 1992]

- Cuando los diferentes tipos de fibras están íntimamente mezcladas entre sí, inmersos homogéneamente en la matriz, se los conoce como híbridos entremezclados.
- Al colocar láminas o capas de distintos tipos de fibra, una a continuación de otra, embebidas en una matriz, se obtiene un híbrido laminado.
- Se conoce como híbridos entretejidos, a aquellos que como refuerzo presentan tejidos elaborados con más de un tipo de fibra.

En cuanto a las investigaciones que se han realizado hasta el momento respecto a los materiales compuestos híbridos, a continuación se resumen algunos que han sido publicados en varios artículos y publicaciones científicas. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009]

1. Efecto del contenido de humedad en compuestos híbridos de vidrio / yute.
2. Propiedad mecánica de resistencia a la tensión de compuestos híbridos poliéster / fibra de sisal tejida / vidrio.
3. Compuestos laminados a base de fibras naturales y sintéticas: efecto negativo de las condiciones ambientales.
4. Caracterización mecánica, perfil térmico y absorción de agua de resinas híbridas de fibra de vidrio / fibra de pijuayo en poliéster insaturado.

En la tabla 1.10 se describen cada uno de estos trabajos de investigación. Cabe aclarar que se presentan solo los resultados de los ensayos mecánicos realizados en condiciones secas, es decir no se muestran los resultados de los ensayos de adsorción de humedad. En la tabla 1.11 se presenta un resumen de los valores de las propiedades mecánicas obtenidas.

Tabla 1.10. Descripción de las investigaciones previas realizadas en el desarrollo de materiales compuestos híbridos. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009]

Nº	Autor(es)	Descripción	Resultados
1	AZEVEDO, A. COSTA, I. FREIRE, E.; Septiembre, 2004	Se estudió las propiedades mecánicas de resistencia y rigidez de un laminado híbrido compuesto de fibra de vidrio E y fibras de yute en forma de placa sándwich. Para esta configuración se utilizaron capas de tejido fibra de vidrio-E (TV), capas de tejido de fibra de yute (TJ) y una capa de relleno (C) COREMAT (tejido base de polietileno). Se usó una distribución de las capas de manera simétrica: [TJ / TV / TJ / C / TJ / TV / TJ], a fin de evitar una posible influencia de la asimetría en la distribución de esfuerzos internos.	Las dimensiones de las muestras de los materiales compuestos híbridos para la tracción se definieron a partir de la norma ASTM D 638. Los valores medios de las muestras en estado seco fueron: resistencia a la rotura de 68,57 MPa a tracción, módulo de elasticidad de 1,24 GPa y la deformación a la rotura del 4,86%. Con dispersiones del 25,01% y 10,91% para la resistencia a la rotura y el módulo elástico, respectivamente.
2	CARVALHO, L. CAVALCANTI, W.; Marzo, 2006	Se investigó el comportamiento mecánico de compuestos híbridos de tejidos de fibra de sisal y de vidrio embebidos en poliéster insaturado como matriz. La configuración del refuerzo fue intercalado [TS / TV / TS/ TV / TS]	Los resultados de los ensayos mecánicos de tracción son los valores promedio de 5 probetas con dimensiones de 110x12,7x3 mm ensayadas según la norma ASTM 3039. Los resultados fueron: resistencia a la tracción 123,8 MPa \pm 13,7%. Módulo de elasticidad 3,83 GPa \pm 0,3%. Con una deformación del 9,9 \pm 0,5 %. Para la formulación del 57% en peso de material híbrido del cual el 28% es de fibra de vidrio.
3	BARROS, A. AQUINO, E. RODRIGUES, L. DA SILVA, R.; Noviembre, 2006	El laminado está formado por una matriz de resina de poliéster reforzada por mantas de fibra de vidrio-E y fibra de curauá orientada en forma longitudinal y continua. El compuesto fue fabricado por laminación manual, con una configuración de cuatro capas de mantas de fibra de vidrio-E, intercaladas con tres capas de fibras longitudinales y continuas curauá.	En los ensayos mecánicos se siguieron las dimensiones y especificaciones de la norma ASTM D3039-00 y ASTM D790-96 para tracción y flexión en tres puntos, respectivamente. Los resultados fueron: Resistencia a la tracción 92,2 MPa \pm 6,7%. Módulo de elasticidad 2,34 GPa \pm 4,4%. Con una deformación del 3,1 \pm 7,2%. En el ensayo de flexión se obtuvieron los siguientes resultados: Resistencia a la flexión 144,49 MPa \pm 4,2%. Módulo de flexión 7,58 GPa \pm 3%. Con una deflexión máxima del 2 \pm 4,7%
4	JUNIOR, O. OLIVEIRA, F. SILVA, D.; Agosto, 2009	Se realizaron tejidos de pijuayo con un espacio entre fibras de 1 cm, puesto que la fibra es gruesa. Se utilizaron mantas de fibra de vidrio. La configuración que se utilizó es la tipo sándwich [TV / TP / TV]	Se obtuvieron probetas de compuesto híbrido con la proporción de matriz y fibra 90/10% en masa. La relación porcentual entre las fibras osciló entre 12 a 26%. Los compuestos fueron sometidos al análisis de resistencia a la tracción (ASTM D638-2a), el impacto Izod (ASTM D256-06). Los resultados fueron: Resistencia a la tracción 19 MPa y Módulo de elasticidad de 5,5 GPa. Para las pruebas de impacto se registró un valor de 2 J. Cabe señalar que no se presenta valores de dispersión.

Tabla 1.11. Resumen de los valores de las propiedades mecánicas obtenidas. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009]

Material Compuesto	Fracción en peso	Resistencia a la rotura [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Módulo de flexión [GPa]	Resistencia al impacto [J]
Poliéster	-	37,1±30%	1,7±10%	59,4±7%	2,29±8%	0,07
Yute-Vidrio/Poliéster	-	68,57±25,01%	1,24±10,9%	-	-	-
Sisal-Vidrio/Poliéster	20%	123,8±13,7%	3,83±0,3%	-	-	-
Curuá-Vidrio/Poliéster	-	92,2±6,7%	2,34±4,4%	144,49±4,2%	7,58±3%	-
Pijuayo-Vidrio/Poliéster	10%	19	5,5	-	-	2

En la tabla 1.12 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas de materiales compuestos híbridos de distintas matrices reforzados con varias fibras naturales.

Tabla 1.12. Propiedades mecánicas de materiales compuestos híbridos de distintas matrices reforzadas con varios tipos de fibras. [Chand, 2008]

Matriz	Fracción volumétrica(V) o en peso (P)			Propiedades mecánicas						
	Sisal	Vidrio	Yute	RT [MPa]	ME [GPa]	ER [%]	RC [MPa]	RF [MPa]	MF [GPa]	
Epoxi	0,30 V	-		12,37	133,3	8,8	-	-	-	
	0,27 V	0,02 V		15,97	160,8	7,64	-	-	-	
	0,24 V	0,04 V		16,68	171,4	7,56	-	-	-	
	0,21 V	0,06 V		16,92	187,5	7,16	-	-	-	
	0,18 V	0,08 V		17,6	192,3	6,9	-	-	-	
	0,15 V	0,10 V		17,76	196,6	6,6	-	-	-	
	0,09 V	0,14 V		19,98	200	5,88	-	-	-	
	0,06 V	0,16 V		20,98	210	5,62	-	-	-	
	-	0,20 V		22,94	220	4,81	-	-	-	
		-	32,9 P	104	15	0,69	95	150	14,6	
			40 P	18 P	157	25,4	0,62	158	445	20,8
			30 P	20 P	143	22,7	0,63	137	418	20,7
			40 P	14,4 P	238	30,6	0,78	204	624	28,3
		68,2 P	-	429	41,3	1,04	320	938	37,4	
Poliéster		-	21,8 P	84	12,2	0,69	123	125	8,1	
			38,5 P	10,1 P	200	18,2	1,10	-	229	17,6
			69,1 P	-	391	38,8	1,01	-	816	32,8

RT: resistencia a la tracción. ME: módulo de elasticidad. ER: elongación a la ruptura. RC: resistencia a la compresión. RF: resistencia a la flexión. MF: módulo a la flexión.

De los resultados se puede notar que los compuestos reforzados únicamente con fibra natural presentan las propiedades mecánicas más bajas, en contraste de los de fibra de vidrio. Los compuestos híbridos están dentro de los valores de las propiedades de los compuestos mencionados y presentan un aumento en sus propiedades conforme incrementa el porcentaje de fibra de vidrio en el refuerzo híbrido.

Además, para un mismo refuerzo híbrido con fracciones en peso similares, la matriz epoxi muestra propiedades superiores que el poliéster. También se nota que para la matriz epoxi, las propiedades del refuerzo de sisal/vidrio son muy bajas excepto en la deformación en relación a los de yute/vidrio. Estos resultados servirán más adelante para comparar los valores de las propiedades que se obtengan del presente proyecto de investigación.

Por otro lado, en la tabla 1.12 se presenta las propiedades mecánicas de varios materiales compuestos de matriz poliéster, reforzado con fibra de vidrio en distintas configuraciones, otros con distintos tipos de fibras de naturales.

Tabla 1.13. Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y fibras naturales. [Maldonado y Paredes, 2010; Chand, 2005]

Material compuesto	Fracción	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Densidad [g/cm ³]
Fibra de vidrio corta 10 mm longitud/Poliéster	0,4 en volumen	103-206	55-138	1,4-2,3
Mats de fibra de vidrio/Poliéster	0,3 en peso	100	7,7	1,4
Tejido de fibra de vidrio/Poliéster	0,4 en volumen	206-344	103-310	1,5-2,1
Fibra de abacá continua unidireccional/Poliéster	0,2 en volumen	82-94	4,08-4,32	1,11-1,17
Fibra de yute/Poliéster	0,21 en peso	84	12,2	-

De los resultados se puede observar que individualmente los refuerzos en los materiales compuestos presentan propiedades y características relevantes que se podrían complementar como: las excelentes propiedades mecánicas de los compuestos de fibra de vidrio y la baja densidad de los reforzados con fibra de abacá. Por ello, al combinar estos dos materiales en un híbrido, se espera obtener un material resistente y liviano, con bajo costo de producción.

1.5. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS

En términos de aplicaciones comerciales, más del 75% de todos los compuestos se fabrican con matrices termoestables. Sus usos predominan en los sectores aeroespacial, automotriz, náutica, artículos deportivos y los mercados de consumo. Hay varios métodos de procesamiento de compuestos termoestables dominantes en el mercado, cada uno con ventajas y limitaciones. En este punto se describen los procesos utilizados en la experimentación del presente trabajo. [Manzumdar, 2002]

Los principales procesos utilizados con materiales termoestables reforzados con fibras incluyen laminado manual, aspersion, bobinado de filamentos y moldeo por transferencia de resina. Estos procesos tienen etapas y procesos comunes. Las etapas son: impregnación, laminado, consolidación y solidificación. En cuanto a los parámetros se tiene: presión, temperatura y tiempo.

1.5.1. ETAPAS Y PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO DE COMPUESTOS

En todos los procesos de fabricación de compuestos intervienen cuatro etapas, a pesar de que estas se pueden llevar a cabo en diferente orden. Estas etapas comprenden: [Manzumdar, 2002]

Impregnación

En este paso, las fibras y la resina se mezclan para formar una lámina. El propósito de este procedimiento es asegurarse de que la resina fluya enteramente alrededor de todas las fibras. La viscosidad, tensión superficial y capilaridad de la resina son los aspectos principales que afectan el proceso de impregnación. En los compuestos termoestables las viscosidades que presentan las resinas facilitan el mojado de las fibras. Mientras que en los compuestos termoplásticos se requiere de una mayor presión de moldeo para alcanzar una buena impregnación, debido a la viscosidad elevada de las matrices.

Laminado

Se colocan mezclas de fibra y resina o productos preimpregnados, en lugares donde más se los necesitan y en el ángulo deseado. El propósito de este paso es lograr la arquitectura de fibra deseada según lo dictado por el diseño. La realización de una estructura compuesta depende en gran medida en la orientación de la fibra y la secuencia del laminado.

Consolidación

La consolidación implica la creación de un contacto íntimo entre cada capa de material preimpregnado o lámina. Este paso asegura que todo el aire atrapado entre las capas se elimine durante el proceso. La consolidación es muy importante en la obtención de un producto de buena calidad. Secciones mal consolidadas tienen vacíos y partes de fibra con pobre mojabilidad.

En los compuestos reforzados con fibras orientadas longitudinalmente se presenta la deformación elástica de estas. Esto se debe a que durante la consolidación la presión aplicada se comparte entre la resina y los arreglos de fibra. Sin embargo, al inicio la presión aplicada es absorbida únicamente por la resina. Las fibras sufren deformación elástica cuando la presión aumenta por lo que la resina fluye por los bordes del molde.

Solidificación

El paso final es la solidificación, que puede tardar menos de un minuto para termoplásticos o pueden tardar hasta 120 minutos para termoestables. Cuanto menor sea el tiempo de solidificación, mayor será la tasa de producción que se puede alcanzar. En compuestos termoestables, la tasa de solidificación depende de la formulación de la resina y la cinética de curado o reticulación.

En las resinas termoestables el calor se suministra durante el proceso para acelerar la tasa de curado. Por lo general, cuanto mayor es la temperatura de curado, más rápido será el proceso de reticulación. En los termoplásticos no hay cambio químico durante la solidificación y por lo tanto esta requiere de menor tiempo.

En cuanto a los parámetros, estos están íntimamente relacionados con las etapas anteriormente descritas. La presión es aplicada para eliminar espacios vacíos y asegurar la mojabilidad de la fibra. La temperatura, en el caso de los compuestos termoestables se la aplica para acelerar el proceso de reticulación y aumentar la tasa de producción. En cuanto a los termoplásticos se la aplica para fundir el material de la matriz. Finalmente el tiempo se relaciona con la solidificación de los compuestos.

1.5.2. LAMINADO MANUAL (HAND LAY-UP)

La laminación manual es un método antiguo pero eficaz, que todavía se utiliza ampliamente para la producción de prototipos y series pequeñas. Con este proceso se puede fabricar piezas con geometrías complicadas y con fracciones volumétricas con alto contenido de fibra.

Es un proceso muy flexible que permite al usuario la optimización de recursos ya que se puede utilizar y combinar diferentes tipos de tejido, fibras y materiales de relleno. El laminado es ampliamente utilizado para la fabricación de botes, tinas de baño, tanques de almacenamiento, y piscinas debido a la simplicidad en la manufactura.

1.5.2.1. Fabricación de Piezas

La resina líquida se aplica en el molde y luego se coloca el refuerzo en la parte superior. Con la ayuda de un rodillo se impregna la fibra con la resina. Capas de resina y refuerzo se aplican hasta alcanzar un espesor deseado. Previamente en el molde se debe aplicar un agente desmoldante para evitar algún daño en la pieza al momento de desmoldar.

El tiempo global del proceso viene dado por el tamaño del componente, así como la formulación de la resina utilizada. Para las estructuras de gran tamaño, como las de botes, el curado a temperatura ambiente es de uso común. Si el laminado que se hará es grueso, el espesor de la pared se construye por etapas para

permitir que la reacción exotérmica que tendrá lugar no tenga riesgo de sobrecalentamiento.

El control de la calidad es relativamente difícil. La calidad final del producto depende en gran medida de la habilidad del operador. Un esquema del proceso de laminación manual se muestra en la figura 1.6. [Manzumdar, 2002; Hoa, 2009]

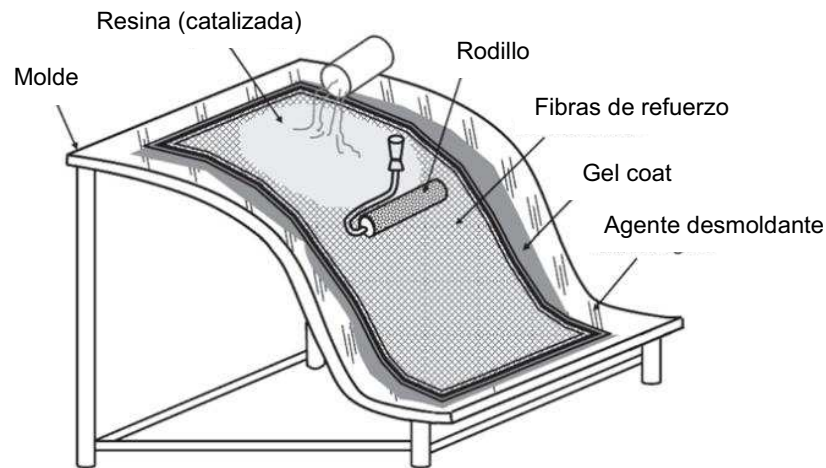


Figura 1.6. Esquema del proceso de producción por laminación manual. [Manzumdar, 2002]

1.5.2.2. Ventajas y limitaciones del proceso de laminado manual

Es una de las técnicas más antiguas en la fabricación de compuestos con las siguientes ventajas y limitaciones:

- En el laminado la inversión de capital que se requiere es muy baja, porque el costo de los equipos que se utilizan es insignificante en comparación con otros procesos.
- El proceso es muy simple y versátil puesto que se pueden utilizar como refuerzo varios tipos de fibra con múltiples orientaciones.
- El costo de fabricación de prototipo es bajo, debido a que se puede utilizar un molde sencillo. Además, la materia prima utilizada para el laminado es mucho más barata que los materiales preimpregnados utilizados en otros procesos.
- El proceso es laborioso.

- Es adecuado principalmente para generación de prototipos, así como para la fabricación de grandes estructuras, mas no para producciones en serie.
- Se realiza a molde abierto por lo que la emisión de estireno es una preocupación importante.
- La calidad final del producto no es uniforme en todas las partes.

1.5.3. MOLDEO POR COMPRESIÓN

El proceso de conformado de moldeo por compresión emplea moldes macho-hembra de una determinada geometría, la cual está relacionada con la pieza o parte estructural a conformar. Una cantidad adecuada de material compuesto es colocada dentro del molde a al cual se le aplica una presión hidráulica adecuada.

Este proceso puede ser realizado a temperatura ambiente o con la adición de calor. Con la incorporación de calor se puede incrementar la fluidez de la matriz logrando así la forma requerida de la pieza y optimizar las condiciones de curado de la resina. En cambio el rol de la presión es el de expulsar el aire atrapado al interior del molde.

Las piezas obtenidas por este método son de fabricación simple. Minimiza los costos de preparación de los materiales y se reduce el desperdicio de los mismos. Además, los procesos de acabado posteriores al moldeo por compresión son de fácil elaboración. Las principales aplicaciones de este proceso comprenden la fabricación de techos, paneles tipo pared, soportes de radiador de automóvil, alerones, componentes del motor, tales como tapas de balancines, cárter de aceite, entre otros. [Manzumdar, 2002; Internet 4]

La presión de moldeo depende de la aplicación a realizarse, de la matriz del compuesto, del espesor del producto, entre otros. A continuación en la tabla 1.14 se presenta varias presiones de moldeo utilizadas en la elaboración de distintos materiales compuestos. Estos valores servirán de guía para seleccionar la presión de moldeo a utilizarse en la experimentación.

Tabla 1.14. Presiones de moldeo utilizadas en la elaboración de distintos materiales compuestos.

[Vilarim, 2003; Carvalho, 2006; Paiva, 1999]

Autor	Material compuesto	Fracción	Presión de moldeo [psi]	Temperatura de moldeo [°C]
Vilarim	Coco/Poliuretano	18% en volumen	1840	ambiente
Carvalho	Sisal-Vidrio/Poliéster	20% en peso, 13,6% sisal-6,5% de vidrio	421	ambiente
Paiva	Bagazo de caña/Fenólico	15% en peso	711	125

1.5.4. CORTE

La operación de corte se realiza para alcanzar las dimensiones deseadas o para obtener varias partes de una parte. Es decir, el corte se lleva a cabo para la fabricación de la forma final de piezas.

El corte se realiza con 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 en la superficie. Con velocidades de corte altas se tienen menos fuerzas de corte perpendiculares en la pieza y en la dirección de avance, que por lo tanto reduce la cantidad de daños en la superficie del producto.

Para el mecanizado de 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 del corte. Para evitar el desgaste excesivo de la herramienta a estas se las recubren con carburo de tungsteno, nitruro de titanio o diamante. [Manzumdar, 2002]

1.5.5. TALADRADO

La operación de taladrado se realiza para crear agujeros en un componente. Dichos agujeros se realizan ya sea con fines de fijación, tales como remaches o

pernos, o para la creación de características especiales, como un paso para la inyección de líquido o una conexión de cable.

El taladrado en materiales compuestos se realiza de forma similar a la perforación de metales. Las herramientas que se utilizan por lo general están recubiertas de carburo de tungsteno, debido a la naturaleza abrasiva de los composites. En la perforación de los metales la punta de las herramientas son diseñadas para calentar el metal cuando están en contacto, con la finalidad de proporcionar el flujo plástico necesario para obtener un corte eficiente. En materiales compuestos, la generación de calor se mantiene baja para evitar la degradación de la matriz local y para impedir la obstrucción de la herramienta. En cuanto a la velocidad de corte, se debe evitar las velocidades altas, puesto que la generación de calor local hace que la matriz se funda o se vean afectadas sus propiedades.

El taladrado crea delaminaciones en materiales compuestos laminados, como se muestra en la figura 1.7. Al taladrar un material compuesto la broca hace que el laminado superior se rasgue y cuando sale del material produce que las láminas se separen entre sí causando delaminaciones.

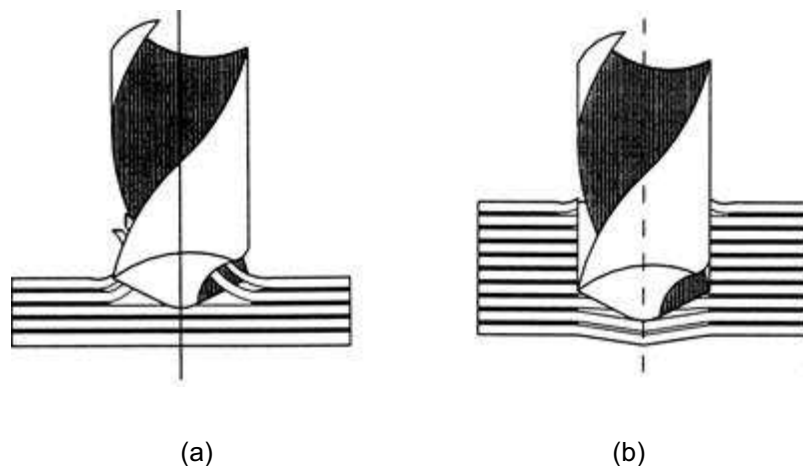


Figura 1.7. Esquema de las delaminaciones causadas por el proceso de taladrado. (a) Al inicio del proceso. (b) Al finalizar el proceso. [Manzumdar, 2002]

La creación de las delaminaciones puede ser minimizada mediante el apoyo del material compuesto sobre un soporte de plástico o de madera, y también mediante la reducción de la velocidad de avance cuando se esté por finalizar el proceso de taladrado. Para evitar que la primera lámina se rasgue al taladrar, se

puede agudizar el ángulo de punta de la broca, con esto se consigue que la penetración sea gradual.

1.6. OBJETIVOS Y ALCANCE

1.6.1. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es:

Obtener, caracterizar y evaluar el desempeño de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificado manual, para fabricar un prototipo de un producto existente en el mercado al cual el compuesto proyecte sustituir.

Los objetivos específicos comprenden:

- Elaborar probetas de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y vidrio por medio de estratificación manual, considerando variables como la configuración del refuerzo híbrido y la fracción volumétrica de los refuerzos.
- Caracterizar mecánicamente las probetas de los materiales compuestos obtenidos a través de ensayos de tracción y flexión.
- Elaborar probetas para ensayos de impacto con el material compuesto que presente la mejor combinación de propiedades mecánicas.
- Elaborar un prototipo de un producto existente en el mercado con la formulación del material compuesto que presente las mejores propiedades mecánicas.
- Comparar el desempeño del prototipo elaborado a partir del material compuesto con el desempeño del producto que se busca reemplazar.

1.6.2. ALCANCE

En este proyecto se pretende fabricar un material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibras de abacá y mats de fibra de vidrio, tomando en cuenta dos variables: la fracción volumétrica del refuerzo y las configuraciones del refuerzo híbrido. Inicialmente se diseñarán los moldes que aseguren la obtención de probetas con las dimensiones especificadas en las normas y que impidan la salida de las fibras al momento de aplicar la presión para garantizar que se mantengan las fracciones volumétricas deseadas. Posteriormente se establecerán las condiciones de procesamiento como son: la presión de moldeo y las concentraciones del iniciador, catalizador, agente desmoldante y tiempo de curado del catalizador, para el proceso de estratificado manual. Las fracciones volumétricas del refuerzo híbrido serán de 15 y 25% en total, y a su vez se variarán las fracciones volumétricas de las fibras de abacá y vidrio dentro de las fracciones totales. En lo referente a las configuraciones del refuerzo híbrido se ensayarán arreglos con fibra orientada longitudinalmente, fibra corta y fibra tejida (tejido plano y sarga).

En segunda instancia se elaborarán probetas de material compuesto para su posterior caracterización mecánica mediante ensayos de tracción y flexión, según las normas ASTM D 3039-00, ASTM D 7264-07, respectivamente. Las formulaciones de material compuesto que presenten propiedades mecánicas superiores serán también evaluadas a través de ensayos de impacto, de acuerdo con la norma ASTM D 5420-04.

Se analizarán los resultados y se seleccionará el material con las mejores propiedades mecánicas, con el que se fabricará un prototipo de un elemento para una aplicación estructural o semiestructural existente en el mercado. Finalmente se comparará el desempeño de los prototipos en base a factores tales como: dimensiones, peso y propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se listan las características de los materiales empleados para la obtención de los compuestos híbridos y los equipos utilizados, describiendo su uso y especificaciones. Seguidamente se presenta la metodología experimental, la cual se dividió en tres etapas que fueron: los ensayos preliminares, la formulación del compuesto híbrido y la caracterización mecánica detallando los ensayos realizados. Finalmente se detalla el proceso seguido en la elaboración del prototipo, así como también, los ensayos realizados para evaluar sus propiedades.

2.1. MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO

En este trabajo se obtuvieron materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con un refuerzo híbrido, el cual fue conformado utilizando fibras de abacá y vidrio, en diferentes configuraciones, disposiciones y cantidades relativas. Con estas consideraciones se fabricaron probetas usando moldes de acero y una prensa. Las probetas y sus dimensiones se pueden apreciar en la figura 2.1.

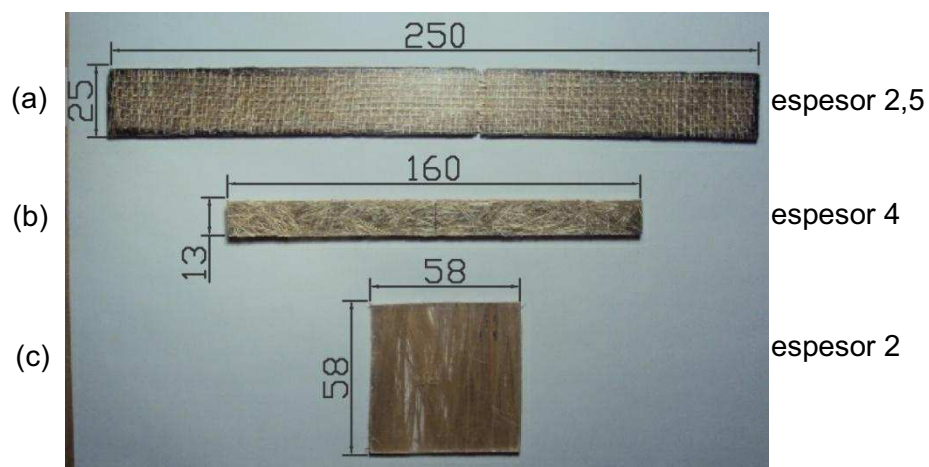


Figura 2.1. Probetas de material compuesto híbrido. (a) Probeta de tracción. (b) Probeta de flexión. (c) Probeta de impacto.

En la tabla 2.1 se resume el tipo y el número de probetas elaboradas a lo largo de la experimentación del presente trabajo.

Tabla 2.1. Tipo y número de probetas elaboradas en el presente trabajo.

Ensayos preliminares				
Configuración del refuerzo	Fracción volumétrica	Número de probetas para ensayos de:		
		Tracción	Flexión	Impacto
Mat de fibra de vidrio	0,15	5	-	-
	0,20	5	-	-
Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud	0,15	5	-	-
	0,20	5	-	-
Fibra unidireccional abacá	0,15	5	-	-
	0,20	5	-	-
Tejido plano abacá	0,15	5	-	-
	0,20	5	-	-
Tejido sarga abacá	0,15	5	-	-
	0,20	5	-	-
Experimentación				
	Fracción volumétrica relativa			
Fibra corta abacá/mat de fibra de vidrio	0,25A/0,75V	5	5	-
	0,50A/0,50V	5	5	-
	0,75A/0,25V	5	5	-
Fibra unidireccional abacá/mat de fibra de vidrio	0,25A/0,75V	5	5	-
	0,50A/0,50V	5	5	-
	0,75A/0,25V	5	5	-
Tejido plano abacá/mat de fibra de vidrio	0,25A/0,75V	5	5	-
	0,50A/0,50V	5	5	-
	0,75A/0,25V	5	5	-
Tejido sarga abacá/mat de fibra de vidrio	0,25A/0,75V	5	5	-
	0,50A/0,50V	5	5	-
	0,75A/0,25V	5	5	-
Selección de la mejor formulación				
Fibra de abacá/mat de fibra de vidrio	mejor formulación	-	-	20
Mat de fibra de vidrio	0,2	-	-	20
Prototipo				
Compuesto híbrido		5	5	-
Material tradicional		5	5	-
Total de probetas:		230		

Las probetas de compuesto híbrido se caracterizaron mecánicamente mediante ensayos de tracción y flexión, realizados en una máquina universal de ensayos. Aquellos materiales que presentaron la mejor combinación de propiedades fueron sometidos a ensayos de impacto y además, fueron utilizados para fabricar el

tablero de una patineta. Se comparó el desempeño del prototipo respecto a una patineta existente en el mercado, mediante ensayos funcionales, que incluían ensayos de tracción y flexión. En la figura 2.2 se presenta un esquema del trabajo realizado en el presente proyecto de titulación, los recuadros con fondo azul muestran las máquinas empleadas en los procesos de la experimentación.

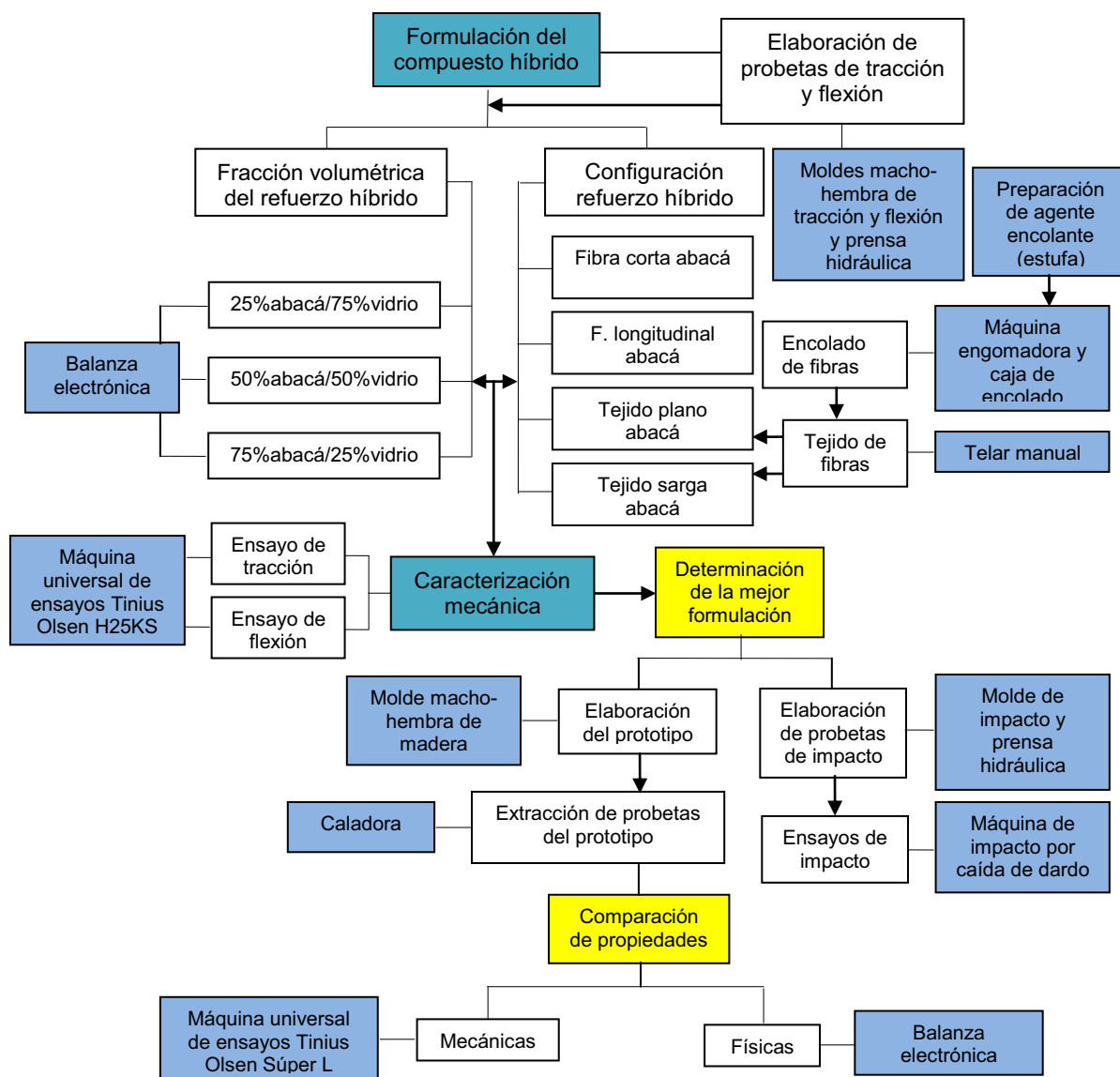


Figura 2.2. Esquema del trabajo desarrollado en el presente proyecto.

2.1.1. MATERIALES

En este apartado se describen las características de los materiales usados en el presente proyecto de investigación.

2.1.1.1. Fibra de Abacá

Se utilizaron fibras de abacá de la variedad tangongón rojo, de grado de calidad 3, las cuales fueron suministradas por un productor de la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas, perteneciente a la Corporación de Abacaleros del Ecuador (CAE). Las fibras fueron descabezadas y despuntadas, utilizándose únicamente aquellas que presentaron mayor uniformidad en su sección transversal a lo largo de su longitud. No se consideraron el diámetro ni la resistencia de las fibras, debido a la variabilidad de estos parámetros. En la figura 2.3 se puede apreciar una muestra de fibra corta de abacá.



Figura 2.3. Fibra corta de abacá.

2.1.1.2. Fibra de Vidrio

El segundo refuerzo utilizado en el material compuesto es la fibra de vidrio. En la figura 2.4 se puede apreciar mechales de fibra de vidrio orientadas aleatoriamente y aglutinadas entre sí, formando una manta.



Figura 2.4. Manta de fibra de vidrio.

La marca de la fibra de vidrio utilizada es Du Tranpro (chopped strand mat fiberglass). La manta está constituida por fibras tipo E y C, las mechas están unidas entre sí con un aglomerante en polvo y emulsión. El mat tiene un espesor de 0,56 mm y una relación peso/área de 0,338 g/cm². La longitud de las fibras que conforman el mat oscilan entre 40 y 52 mm, con un diámetro de aproximadamente 0,02 mm.

2.1.1.3. Resina Poliéster

Como matriz del compuesto híbrido se usó una resina poliéster ortoftálica, la cual fue suministrada por Poliquim. La denominación comercial de esta resina es ANDERPOL 859, la cual es apropiada para laminación manual. Tiene un punto de inflamación de 31°C, lo que la hace un líquido inflamable. Por esto se recomienda mantenerla alejada de las llamas y almacenarla a temperaturas inferiores a los 20°C.

En la tabla 2.1 se resumen las características de la resina poliéster ANDERPOL 859 entregadas por el proveedor, mientras que en la figura 2.5 se puede apreciar el aspecto de esta resina.

Tabla 2.2. Propiedades de la resina poliéster ortoftálica ANDERPOL 859. Fuente Poliquim.

Propiedades Físicas	
Viscosidad	1,5-2,5 Pa.s
Densidad en estado sólido	1,18 g/cm ³
Propiedades Mecánicas	
Resistencia a la tracción	48 MPa
Elongación a la ruptura	4,5 %
Propiedades Térmicas	
Temperatura de exotermia	130-145° C



Figura 2.5. Muestra de resina poliéster Anderpol 859.

Fueron empleados además otros materiales tales como:

- Como agente desmoldante se utilizó una cera en pasta marca Simoniz. Como advertencia el fabricante recomienda evitar el contacto con los ojos, la ingesta de esta cera, además no presenta riesgos al inhalarla ni al contacto con la piel.
- Estireno monómero, como disolvente de la resina poliéster. Tiene un punto de inflamación de 31°C, lo que lo hace un líquido inflamable, por lo que se recomienda almacenarlo a temperaturas menores a 20°C y conservarlo cerrado herméticamente, puesto que a esta temperatura la sustancia se evapora y se puede alcanzar lentamente una concentración nociva en el aire. La densidad de este producto es de 0,9 g/cm³.
- Octoato de cobalto, utilizado como iniciador del proceso de curado.
- Peróxido de metil-etil cetona (MEKP), que se usó como catalizador.
- Polivinil alcohol, el cual fue el agente engomante en el encolado de las fibras de abacá. El alcohol fue diluido en agua destilada.

Dichos materiales fueron suministrados por la empresa TRECX S.A.

2.1.2. EQUIPOS Y MOLDES

Se fabricaron moldes macho-hembra de tres partes en acero ASTM A36, para la elaboración de probetas de tracción, flexión e impacto de acuerdo con las normas ASTM D 3039-08, ASTM D 7264M-07 y ASTM D 5628-07, respectivamente. En la figura 2.6 se puede apreciar los moldes utilizados. Los planos de estos se encuentran en el anexo II.

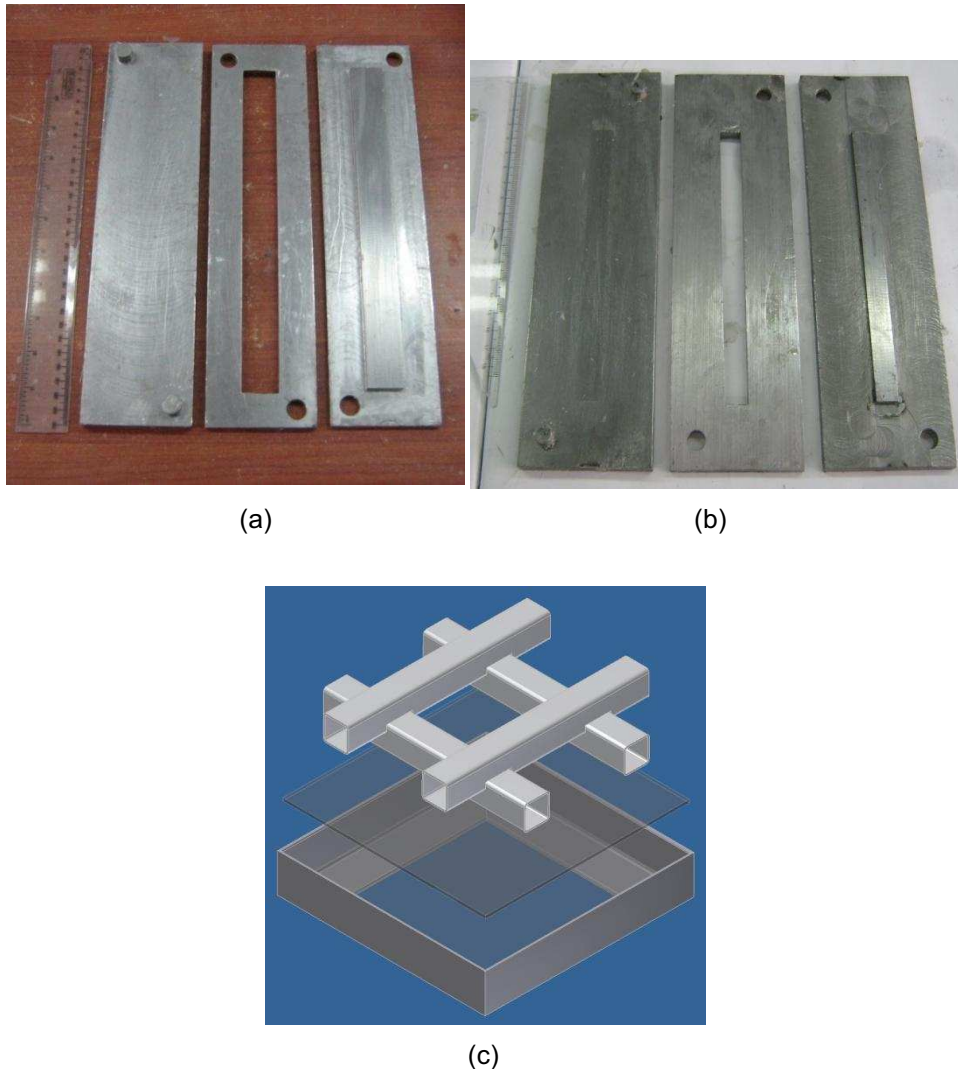


Figura 2.6. (a) Molde de tracción. (b) Molde de flexión. (c) Molde de impacto.

La aplicación de presión para el moldeo de las probetas se realizó en una prensa hidráulica manual de 12 toneladas de capacidad, la cual es de doble columna con

66 cm de separación entre las mismas. La prensa está ubicada en el Laboratorio de Nuevos Materiales y se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7. Prensa hidráulica de 12 toneladas de capacidad utilizada para el moldeo y distancia entre columnas de 66 cm.

El pesaje del refuerzo y el registro del peso de las probetas se realizaron en una balanza electrónica ADAM modelo PGL 6001, de 6000 g de capacidad y con una apreciación de 0,1 g. Esta balanza se puede apreciar en la figura 2.8.

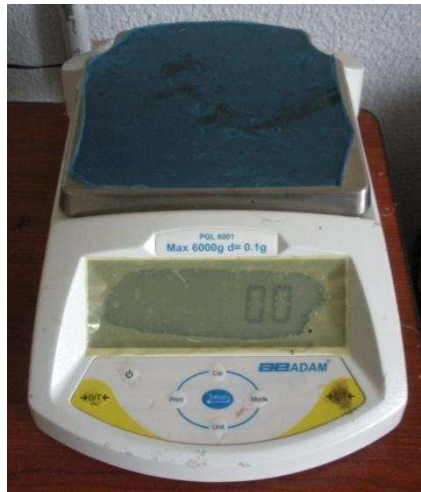


Figura 2.8. Balanza electrónica ADAM de 6000 g de capacidad y 0,1 g de apreciación.

Por otro lado, para poder tejer las fibras de abacá estas fueron encoladas, con la finalidad de protegerlas contra la tracción, fatiga y abrasión que se generan durante el tisaje, lo que produce que se separen fibrillas del cuerpo principal de la fibra. Se realizó el encolado de acuerdo al proceso descrito en el proyecto de

titulación “Estudio del Efecto de Encolado de Fibra de Abacá en el Mejoramiento de su capacidad de Tisaje”. [Pontón, 2009]

Se empleó como máquina engomadora al equipo de impregnación Foulard Ernst Benz LEV 5007 2R ubicada en el Centro Textil Politécnico, con las adaptaciones acordadas a las necesidades, las mismas que se describen en la tabla 2.2.

Tabla 2.3. Adaptaciones realizadas al Foulard Ernst Benz LEV 5007 2R. [Pontón, 2009]

Nº	Adaptación	Descripción	Función
1	Bobina de alimentación	Es un carrete de plástico, de aquellos que se utilizan para embobinar hilos.	Alimentar a las fibras de una manera ordenada, para evitar que se unan entre sí.
2	Caja de encolado	Es un recipiente de vidrio pirex, de dimensiones 19x14x4,5 cm, que tiene tres varillas de vidrio fijas: una de inmersión y dos varillas guidoras. Las varillas guidoras poseen ranuras con una separación de 1 cm entre una ranura y otra.	Contener al líquido encolante. Su varilla de inmersión obliga a las fibras a estar en contacto con la solución encolante. Las varillas guidoras eliminan cierta cantidad de líquido de las fibras, a la vez que las conducen hacia los rodillos de exprimido del Foulard, sin que se peguen entre ellas.

En la Figura 2.9, se muestra al equipo Foulard con sus adaptaciones y en la Figura 2.10, se presenta la caja de encolado utilizada.



Figura 2.9. Foulard Ernst Benz LEV 5007 2R con sus adaptaciones. (1) Bobina de alimentación. (2) Caja de encolado. [Pontón, 2009]



Figura 2.10. Caja de encolado adaptada al Foulard. [Pontón, 2009]

Para la preparación del agente encolante se usó una estufa Thermo Scientific modelo Cimarec, la cual alcanza un rango de temperaturas de 5 a 540°C, en incrementos de 5°C. Además de la estufa se usaron de otros implementos de laboratorio como: vaso de precipitación, agitador y termómetro. En la figura 2.11 se puede observar la estufa utilizada.



Figura 2.11. Estufa Thermo Scientific modelo Cimarec.

Las fibras de abacá encoladas se utilizaron para elaborar los tejidos plano y sarga en un telar manual artesanal tipo peine con cuatro marcos de lisos, con un espacio útil de tejido de aproximadamente 50 cm y un espacio entre fibras de 3 a 4 mm. El telar fabricado por un artesano ecuatoriano se muestra en la figura 2.12.



Figura 2.12. Telar manual usado para tejer fibras de abacá.

La caracterización mecánica se la realizó en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25K-S, de 25000 N de capacidad, con una velocidad máxima de ensayo de 1000 mm/min. Esta es una máquina electromecánica de doble columna, con 41 cm de separación entre las mismas. Para los ensayos a tracción se usaron mordazas cuneiformes, mientras que para los ensayos de flexión se empleó el set de flexión a tres puntos. En la figura 2.13 se puede apreciar los equipos aquí mencionados.

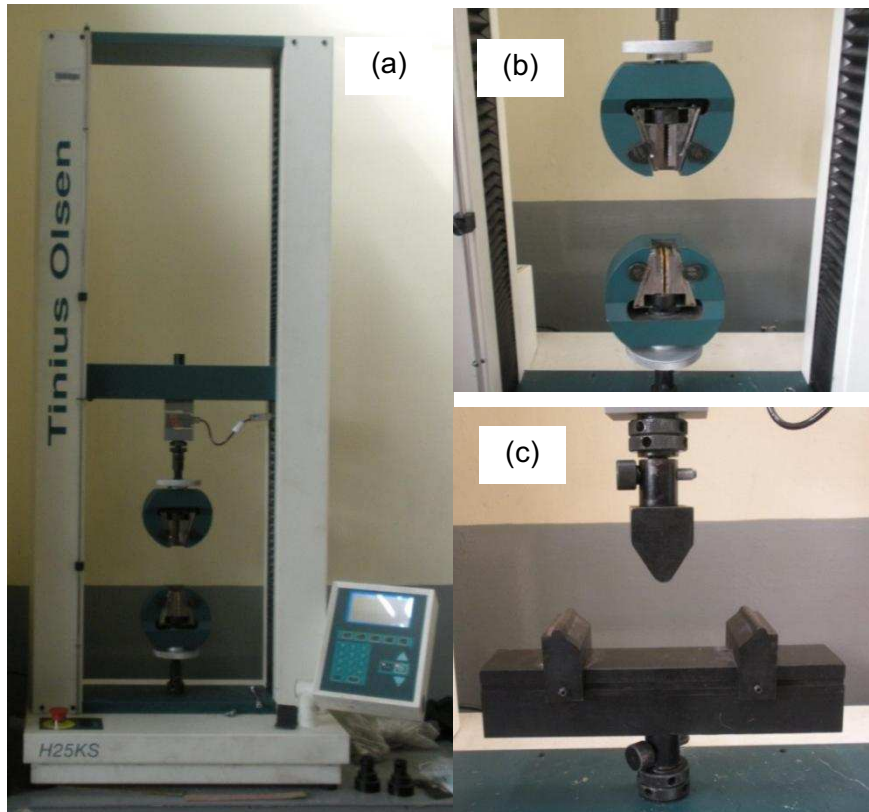


Figura 2.13. (a) Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS. (b) Mordazas cuneiformes. (c) Set de flexión a tres puntos.

Las probetas de impacto elaboradas con la mejor formulación de compuesto híbrido se ensayaron en la máquina de impacto por caída de dardo para polímeros del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones. Se usó un dardo de 20 mm de diámetro. Los elementos usados en este ensayo se muestran en la figura 2.14.

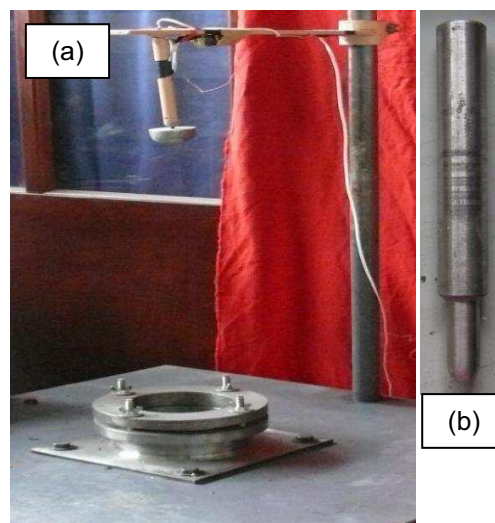


Figura 2.14. (a) Máquina de impacto por caída de dardo. (b) Dardo.

El prototipo fue fabricado en un molde macho-hembra construido de madera. Dicho molde está recubierto de placas de melamínico, para obtener un mejor acabado superficial en los prototipos. En la figura 2.15 se ilustra el molde utilizado.



Figura 2.15. Molde macho-hembra de madera usado en la fabricación del prototipo.

De los prototipos elaborados se obtuvieron probetas para ensayos mecánicos, las mismas que fueron cortadas con una caladora marca Skil modelo 4390 de 600 W de potencia, ilustrada en la figura 2.16.



Figura 2.16. Caladora Skill modelo 4390 de 600 W de potencia.

La evaluación de las propiedades mecánicas del prototipo se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, en la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo Súper L. Para los ensayos de tracción se usaron mordazas cuneiformes, mientras que para los ensayos de flexión se empleó el set de flexión a tres puntos. En la figura 2.17 se muestran los equipos mencionados.



Figura 2.17. (a) Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo Súper L. (b) Mordazas Cuneiformes. (c) Set de flexión a tres puntos.

2.2. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Previamente se estableció el tipo de molde y la presión de moldeo adecuados para reducir los defectos superficiales e internos de las probetas y obtener los espesores establecidos en cada norma de ensayo. Para ello se probaron dos tipos de molde, el uno un molde de tapa y el otro macho hembra, ilustrados en la figura 2.18.



(a)

(b)

Figura 2.18. (a) Molde de tapa. (b) Molde macho-hembra.

En la selección del tipo de molde, la metodología de prueba consistió en fabricar probetas únicamente de resina poliéster en cada uno de los moldes, para luego visualizar con que tipo se produjeron la menor cantidad de burbujas. Cabe señalar que la presión de moldeo fue tomada de la tabla 1.14. Se escogió como referencia la presión más baja que fue de 421 psi, para evitar deformaciones en los moldes y que se atasquen los componentes del mismo. Se decidió escoger una presión de 500 psi por facilitar la lectura en el manómetro.

Para establecer la presión de moldeo adecuada se elaboraron probetas de resina poliéster con una presión inicial de 500 psi, luego se incrementó la presión en un rango del mismo valor de la presión inicial. Posteriormente se midieron los espesores de las probetas para compararlas con las dimensiones descritas en la norma; este fue el parámetro para seleccionar la presión.

Luego se definió la mejor fracción volumétrica, para lo cual se elaboraron dos tipos de material compuesto, el uno reforzado con fibra de vidrio y el otro con fibra de abacá en cuatro distintas configuraciones, las cuales fueron: fibra picada, fibra continua unidireccional, tejido plano y tejido sarga. Los compuestos fueron de matriz poliéster con fracciones volumétricas del refuerzo del 0,15 y 0,2. Posteriormente se realizaron ensayos mecánicos de tracción para determinar la

fracción volumétrica con mejores propiedades, la cual se tomó como la fracción de compuesto híbrido en el resto de la experimentación.

A continuación se obtuvieron probetas de material compuesto híbrido, para lo cual se tomó en cuenta dos variables: una de ellas fue la configuración del refuerzo y la otra fue la fracción volumétrica del refuerzo híbrido. En el primer caso los arreglos de fibra de abacá fueron los mismos que se usaron en los ensayos preliminares, mencionados en el párrafo anterior. Respecto a la segunda variable, la fracción volumétrica total se la determinó en los ensayos preliminares, y a su vez se variaron las fracciones volumétricas de las fibras de abacá y vidrio dentro de la fracción total en proporciones del 25/75%, 50/50% y 75/25%. Cabe señalar que se fabricaron cinco probetas por formulación. Posteriormente se evaluaron las propiedades mecánicas a tracción y flexión de las probetas de compuesto híbrido según los parámetros descritos en las normas ASTM D 3039-08 y ASTM D 7264M-07, respectivamente. Para determinar la configuración con mejores características, los resultados fueron evaluados con la ayuda del programa Statgraphics plus versión 5.1.

Con la formulación del material que presentó la mejor combinación de propiedades mecánicas, se fabricaron 20 probetas de impacto. Estas probetas fueron ensayadas bajo los parámetros descritos en la norma ASTM D 5628-07 y arrojaron los resultados de resistencia al impacto.

Finalmente se construyó un prototipo de un producto existente en el mercado, con la misma formulación de material híbrido con la cual se realizaron las pruebas de impacto. Se comparó el desempeño de los dos prototipos en base a factores tales como: dimensiones, peso y propiedades mecánicas.

En la figura 2.19 se esquematiza la metodología experimental seguida en el presente proyecto de investigación.

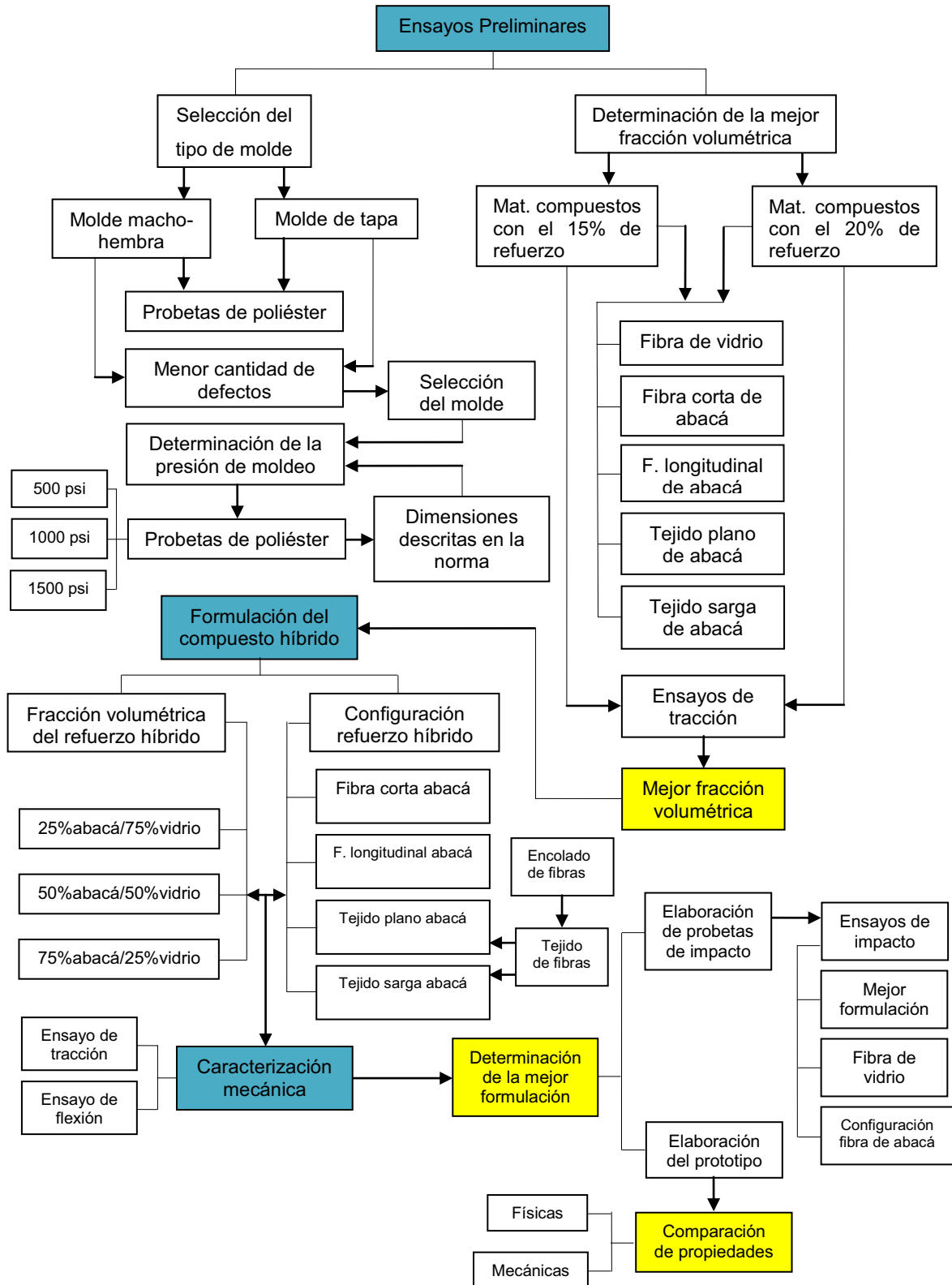


Figura 2.19. Esquema de la estrategia metodológica seguida en el proyecto de titulación.

2.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.3.1. ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS

Primero se definieron las cantidades óptimas de diluyente, iniciador y catalizador a ser adicionadas a la resina poliéster. Pruebas realizadas en el estudio “Obtención de Materiales Compuestos de Matriz Poliéster Reforzados con Fibra de Abacá Mediante Estratificación Manual” [Guerrero y Pontón, 2010], permitieron establecer que, concentraciones en volumen del 11% de estireno monómero para reducir la viscosidad de la resina y así mejorar su mojabilidad con las fibras, 0,5% de octoato de cobalto y 0,75 % de MEKP, dieron como resultado un tiempo parcial de curado del material de 2 horas, tiempo necesario para desmoldar fácilmente las probetas de material compuesto sin que estas sufrieran deformaciones.

Las probetas de material compuesto se obtuvieron mediante estratificación manual. Cada vez que se elaboraban probetas se preparaba 200 ml de resina poliéster, a la cual se le añadía 22 ml de estireno, 1,12 ml de octoato de cobalto y 4,68 de MEKP. En la fabricación de una probeta de tracción se usó 40 ml de esta solución, mientras que para una de flexión 30 ml. Cabe señalar que esta mezcla se la realizó en vasos descartables.

Se depositó parte de esta solución en el molde, sobre el cual se colocó una capa de fibras cortas de abacá correspondiente a la mitad de la fracción volumétrica de refuerzo, la totalidad de la fracción de fibra de vidrio, el resto de resina y finalmente la segunda porción de fibra de abacá. Los moldes se colocaron en una prensa manual hidráulica a una presión de 1000 psi durante 2 horas. Transcurrido este tiempo las probetas fueron desmoldadas, para facilidad en el retiro de las probetas del molde previamente se aplicó agente desmoldante sobre éste con un paño húmedo y se retiró el exceso de cera con un paño seco. Cabe señalar que se utilizó esta configuración en los refuerzos, a fin de evitar una posible influencia de la asimetría en la distribución de esfuerzos internos. [Azevedo, 2004]

Durante este proceso fue importante controlar la presión de moldeo para obtener los espesores normalizados en las probetas y el tiempo de curado para desmoldar

las probetas. Al retirar las probetas prematuramente de los moldes, estas se fracturaban y resquebrajaban, mientras que al desmoldarlas tardíamente los especímenes se adherían fuertemente a las paredes del molde.

Un procedimiento similar se efectuó para la elaboración de probetas de material compuesto híbrido con fibra continua orientada en el sentido longitudinal, tejido plano y sarga de fibra de abacá. Cabe indicar que se elaboraron los tejidos de abacá previamente. El procedimiento seguido fue: seleccionar las fibras que presentaron uniformidad en su sección transversal en toda su longitud, posteriormente las fibras fueron encoladas con un agente engomante de 3 g de polivinil alcohol disuelto en 100 ml de agua destilada a 80°C. Finalmente se elaboraron los tejidos plano y sarga, los mismos que tuvieron 9 y 5 fibras por centímetro en la dirección transversal y longitudinal, respectivamente. En la figura 2.20 se presenta las representaciones esquemáticas y fotografías de la disposición de las fibras en estos tejidos.

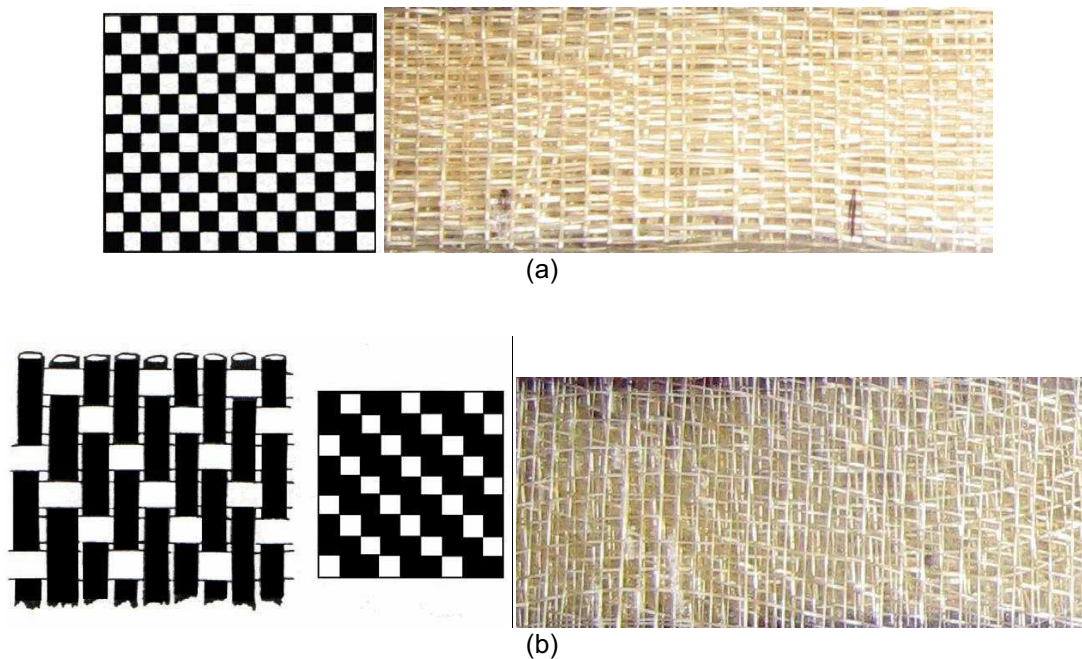


Figura 2.20. (a) Tejido plano. (b) Tejido sarga. [Pontón, 2009]

En el Anexo III se presenta un procedimiento más detallado de la elaboración de probetas del material compuesto, con las cantidades de las fibras y resina adicionadas según la fracción volumétrica del compuesto híbrido. Mientras que en

el Anexo IV se muestra el proceso de obtención de los tejidos plano y sarga de fibra de abacá.

2.3.2. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

Con la mejor formulación de material compuesto híbrido obtenida de la caracterización mecánica, se analizaron varias alternativas para un prototipo a construir usando dicho compuesto. La selección de la alternativa a fabricar, se realizó en base a un conjunto de parámetros, los cuales fueron valorados por una tabla de prioridades.

El prototipo fue construido mediante un proceso relativamente sencillo. A pesar de que dicho proceso fue distinto al seguido en la elaboración de probetas. Las principales diferencias fueron: no se utilizó la misma presión de moldeo utilizada en la elaboración de probetas de compuesto híbrido, la cual fue de 1,1 psi. Dicha presión se alcanzó colocando sacos sobre el molde de madera, mientras que los especímenes fueron moldeados en una prensa hidráulica. Además, el prototipo se desmoldó transcurrida una hora del proceso de curado, en contraste del las 2 horas empleadas en la reticulación de las probetas. Como no se tuvo las mismas condiciones de procesamiento en el prototipo y las probetas, los resultados variaron como se analizará más adelante en la discusión de resultados.

El proceso de fabricación del prototipo fue: inicialmente se preparó el refuerzo, el poliéster y el molde, para lo que se seleccionó la fibra de abacá para luego pesarla junto con el mat de fibra de vidrio. Luego, se preparó la solución de poliéster, estireno, octoato de cobalto y MEKP con las mismas concentraciones en volumen usadas en la elaboración de las probetas. Por último se enceró y armo el molde de madera. Este proceso se realizó en alrededor de una hora.

Posteriormente se laminó el prototipo, es decir se colocaron las capas de refuerzo con la misma configuración usada en la elaboración de probetas y se adicionó la resina poliéster. Se aplicó la presión de moldeo para lo que se utilizaron sacos de 25 kg, el peso total usado fue de 235 kg aproximadamente. Este proceso se realizó en 30 minutos.

El prototipo se desmoldó transcurrida una hora del proceso de curado aún cuando no estaba completamente sólido. Luego, se lo colocó sobre el modelo original bajo un peso de 160 kg para que adopte la forma del mismo durante 3 horas. Posteriormente, se maquinó el prototipo para darle la forma final, lo que se realizó en alrededor de una hora. Las operaciones de maquinado realizadas fueron el corte y el taladrado.

Durante la fabricación del prototipo se presentaron ciertas complicaciones como: la distribución y alineación de las fibras de abacá en el molde de madera, debido a que el área del mismo es muy superior en comparación con los moldes de acero. No se tuvo un control eficaz del espesor. Para superar esta dificultad, se realizaron varias pruebas con distintas presiones hasta obtener el espesor deseado. El tiempo de desmoldeo fue un factor influyente, puesto que al desmoldar el prototipo prematuramente se rompía y resquebrajaba. Mientras que un retraso en este proceso impedía que adopte la forma del modelo original. Esquemáticamente este proceso se presenta en la figura 2.21.

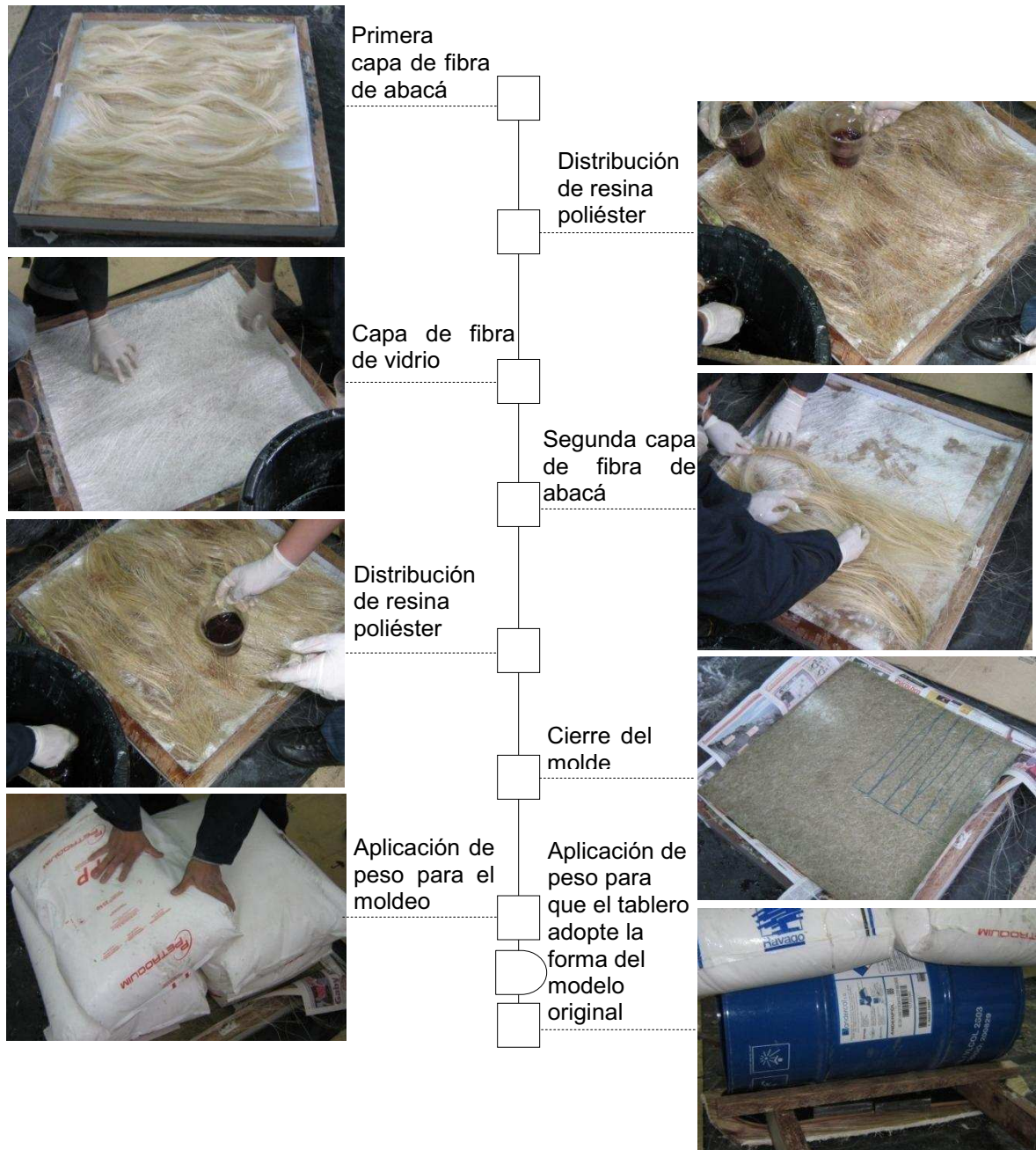


Figura 2.21. Esquema del proceso seguido en la elaboración del prototipo.

2.3.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

Las probetas de material compuesto fueron caracterizadas mecánicamente transcurridas al menos 2 semanas a partir de su fabricación, de acuerdo a referencias bibliográficas que indican que el curado de la resina poliéster a

temperatura ambiente se completa en este período de tiempo. [Guerrero y Pontón, 2010]

2.3.3.1. Ensayo de Tracción, Flexión e Impacto

La evaluación del esfuerzo máximo a la tracción y porcentaje de elongación a la ruptura se realizó según la norma ASTM D 3039-08, en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS. La velocidad del ensayo fue de 2 mm/min. Las dimensiones de las probetas prescritas en la norma antes mencionada son de 250x25x2,5 mm. Cabe señalar que también se determinó el módulo de elasticidad a partir de las curvas esfuerzo-deformación de los compuestos híbridos.

La evaluación de la deflexión y el esfuerzo máximo a la flexión a tres puntos se efectuó en base a la norma ASTM D 7264M-07, en la máquina de ensayos ya mencionada. La velocidad del ensayo fue de 1 mm/min, las dimensiones de las probetas de acuerdo a la norma son de 160x13x4 mm y la distancia entre puntos para realizar el ensayo fue de 128 mm, que corresponde a 32 veces el espesor. De la misma forma, en este caso también se determinó el módulo a la flexión a partir de las curvas esfuerzo-deformación de los compuestos híbridos.

La determinación de la resistencia al impacto por caída de dardo, se la realizó bajo la norma ASTM D5628. Se escogió la geometría FE cuadrada de 58x58x2 mm. La base que soportó a las probetas cuenta con un diámetro de apertura de 40 mm. Además el dardo utilizado tiene un diámetro de 20 mm.

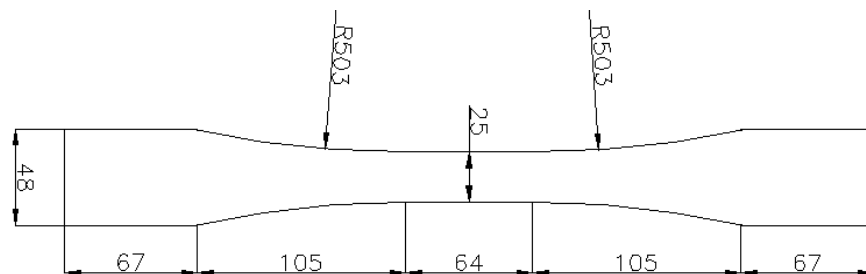
La definición de la altura inicial de prueba se determinó realizando varios ensayos preliminares, los cuales consistieron en impactar una probeta defectuosa del material compuesto a ensayar, variando la altura de caída arbitrariamente hasta que la probeta se rompa, posteriormente se la sustituyó por otra probeta de desecho hasta que el impacto logre romperla de un solo golpe. Esta altura fue la altura inicial de ensayo. La variación de la altura durante el ensayo no debe ser mayor a 2 cm según lo prescrito en la norma.

2.3.3.2. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del prototipo

La evaluación de las propiedades físicas se las realizó en base a parámetros fundamentales como las dimensiones por el uso del prototipo y el peso que está relacionado con la facilidad de desplazamiento al momento de utilizarlo. Para el primero se midieron los prototipos de material compuesto y el prototipo original. En cuanto a lo segundo se pesaron los prototipos para el posterior cálculo de la densidad.

Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante ensayos de tracción y flexión en base a las normas ASTM D3500-90 método C y ASTM D3043-00 método A, respectivamente. Para la realización de estos ensayos se extrajeron mediante el corte con una caladora probetas del prototipo construido.

La evaluación del esfuerzo máximo a la tracción y elongación a la ruptura fue realizada en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen Súper L, la velocidad de ensayo fue de 0,9 mm/min. Además se determinó el módulo de elasticidad. En la figura 2.22 se muestra las dimensiones de la probeta establecidas en esta norma.



(a)



(b)

Figura 2.22. Probeta para ensayo de tracción del prototipo. (a) Esquema de la probeta (dimensiones en mm). (b) Probeta extraída del prototipo.

La evaluación del esfuerzo máximo a la flexión y de la deflexión se realizó en la máquina ya mencionada con el equipo de flexión a tres puntos. La distancia entre

puntos para ensayo fue de 48 veces el espesor. La longitud de las probetas fue la del espacio entre puntos más 2 pulgadas, mientras que el ancho fue de 2 pulgadas, según lo prescrito en la norma de ensayo utilizada. La velocidad de ensayo fue determinada mediante la ecuación 2.1. y fue fijada en el control automático de la máquina universal de ensayos.

$$N = \frac{zL^2}{6d} \quad (2.1)$$

Donde:

N: Velocidad de ensayo.

z: Constante de tasa de aplicación de carga (0.0015 mm/mm.min).

L: Espacio entre puntos de ensayo.

d: Espesor del espécimen de ensayo.

En la tabla 2.4 se muestra los valores calculados para la distancia entre puntos, la longitud y la velocidad de ensayo para cada espécimen de ensayo de compuesto híbrido y material del prototipo.

Tabla 2.4. Velocidad y espacio entre puntos para el ensayo de flexión de probetas del material del prototipo.

Material compuesto híbrido				
Probeta	Espesor promedio [mm]	Distancia entre puntos [mm]	Longitud de la probeta [mm]	Velocidad de ensayo [mm/min]
1	10,85	520,96	501,76	6,25
2	10,52	504,96	555,76	6,05
3	10,12	486,08	536,88	5,83
4	10,7	513,76	564,56	6,16
5	10,54	506,32	557,12	6,07
Material del prototipo				
1	11,85	569,2	620	6,83
2	11,95	574	624,8	6,88
3	11,95	573,6	624,4	6,88
4	11,73	563,12	613,92	6,75
5	11,86	569,36	620,16	6,83

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos de la experimentación detallada en el Capítulo 2. Se exponen los resultados de los ensayos preliminares concernientes a la selección del tipo de molde y la presión de moldeo adecuada, así como también la determinación de la mejor fracción volumétrica a emplear en los compuestos. La caracterización mecánica del material compuesto híbrido la cual fue realizada mediante ensayos de tracción y flexión. Con base en estos resultados se escogió la formulación con la mejor combinación de propiedades, con la que se elaboró probetas para ensayos de impacto además de un prototipo. Para todo lo expuesto se discuten los resultados centrándose en el comportamiento mecánico de estos materiales.

3.1. ENSAYOS PRELIMINARES

Un molde de tapa y un molde macho-hembra fueron utilizados para elaborar probetas a partir de resina poliéster. Los moldes fueron fabricados en acero ASTM A-36 mediante procesos de fresado y rectificado. Una vez obtenidas las probetas el objetivo se centró en observar la cantidad de defectos que presentaban. En el molde de tapa se obtuvieron probetas con burbujas con diámetros de hasta 5 mm a nivel superficial e interno. En el molde macho-hembra los defectos en las probetas fueron mínimos y solo a nivel superficial en ciertos especímenes. La disminución de los defectos en las probetas se pudo conseguir gracias a que el émbolo de la tapa de este tipo de molde impidió que la resina fugue del molde. Dichos defectos generados en las dos clases de moldes se los muestra en la figura 3.1.

Por lo descrito anteriormente el molde seleccionado para la elaboración de probetas de material compuesto híbrido en el resto de la experimentación fue el

de tipo macho-hembra. Cabe señalar que el acabado superficial del molde influyó en el comportamiento mecánico de las probetas, puesto que se pudo obtener especímenes de ensayo con una superficie lisa con lo que se disminuyeron los concentradores de esfuerzos superficiales.



(a)



(b)

Figura 3.1. Defectos en las probetas de resina obtenidas con: (a) Molde de tapa. (b) Molde macho-hembra.

En cuanto a la determinación de la presión de moldeo, se elaboraron probetas de resina poliéster en el molde macho-hembra a tres presiones distintas: 500, 1000, 1500 psi. A 500 psi los espesores de las probetas fueron mayores que los $2,5 \pm 0,1$ mm descritos en la norma ASTM D 3039-08. A 1000 psi los espesores medidos estuvieron dentro de la tolerancia detallada en la norma. Finalmente a 1500 psi los espesores estaban muy por debajo de lo requerido. Por esta razón la presión de moldeo que se usó en el resto de la experimentación fue de 1000 psi.

3.1.1. DETERMINACIÓN DE LA MEJOR FRACCIÓN VOLUMÉTRICA

La comparación de las propiedades mecánicas tales como esfuerzo máximo, deformación máxima y módulo de elasticidad, así como también la densidad, de los distintos tipos de materiales compuestos se realizó con el programa Statgraphics Plus 5.1. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) cuando las

distribuciones muestrales se aproximaron a una distribución normal, junto con el método de las diferencias menos significativas de Fisher (LSD) para realizar comparaciones múltiples entre muestras y así determinar aquellas que presentaron diferencias estadísticamente significativas. En los casos en los cuales no fue posible aplicar el ANOVA por incumplir las restricciones de normalidad de este análisis, se empleó su versión no paramétrica correspondiente al método de Kruskal-Wallis junto con las gráficas de cajas y bigotes con muesca. En el Anexo V se muestra el procedimiento seguido en los análisis estadísticos en el programa mencionado.

Para realizar los análisis estadísticos indicados se utilizó un nivel de confianza del 95%. Este intervalo, se seleccionó debido al tamaño reducido de las muestras (5 ejemplares por ensayo) y a que el proceso de fabricación no estuvo controlado, lo que no permitió emplear un intervalo de confianza mayor.

Durante el ensayo se recolectaron datos de fuerza en Newtons y deflexión en milímetros. Con estos valores se calculó el esfuerzo máximo a la tracción y la deformación unitaria mediante las ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente.

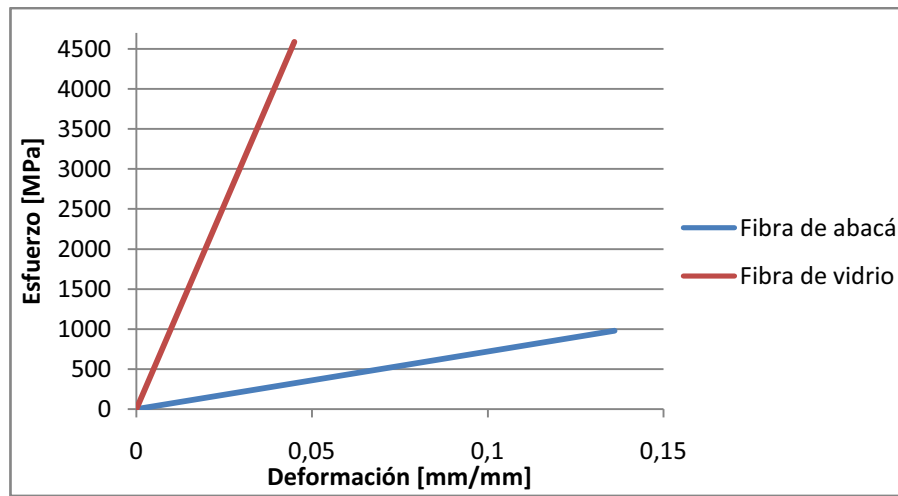
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (3.2)$$

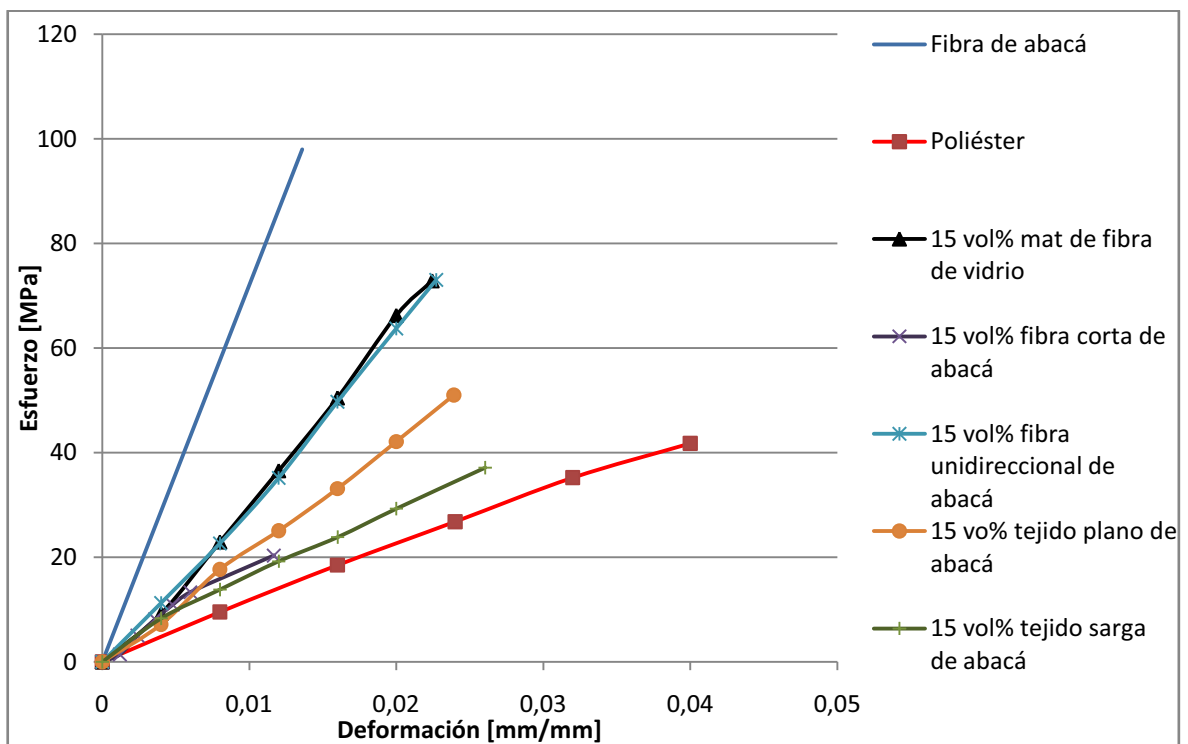
donde: σ : esfuerzo máximo, F : fuerza aplicada al espécimen de ensayo, A : área promedio de la probeta, ε : deformación unitaria, δ : deflexión, L : longitud inicial de ensayo.

En la figura 3.2 se muestra las curvas típicas esfuerzo-deformación de los materiales compuestos reforzados con las distintas configuraciones y tipos de fibras, de la resina poliéster y de las fibras de abacá y vidrio. Dichas curvas corresponden a una probeta de cada formulación, se seleccionó aquel espécimen de ensayo cuyas propiedades mecánicas se aproximan al promedio del grupo de probetas ensayadas. Las gráficas de las fibras de abacá y vidrio están representadas solo con los datos de la resistencia a la tracción y la deformación a

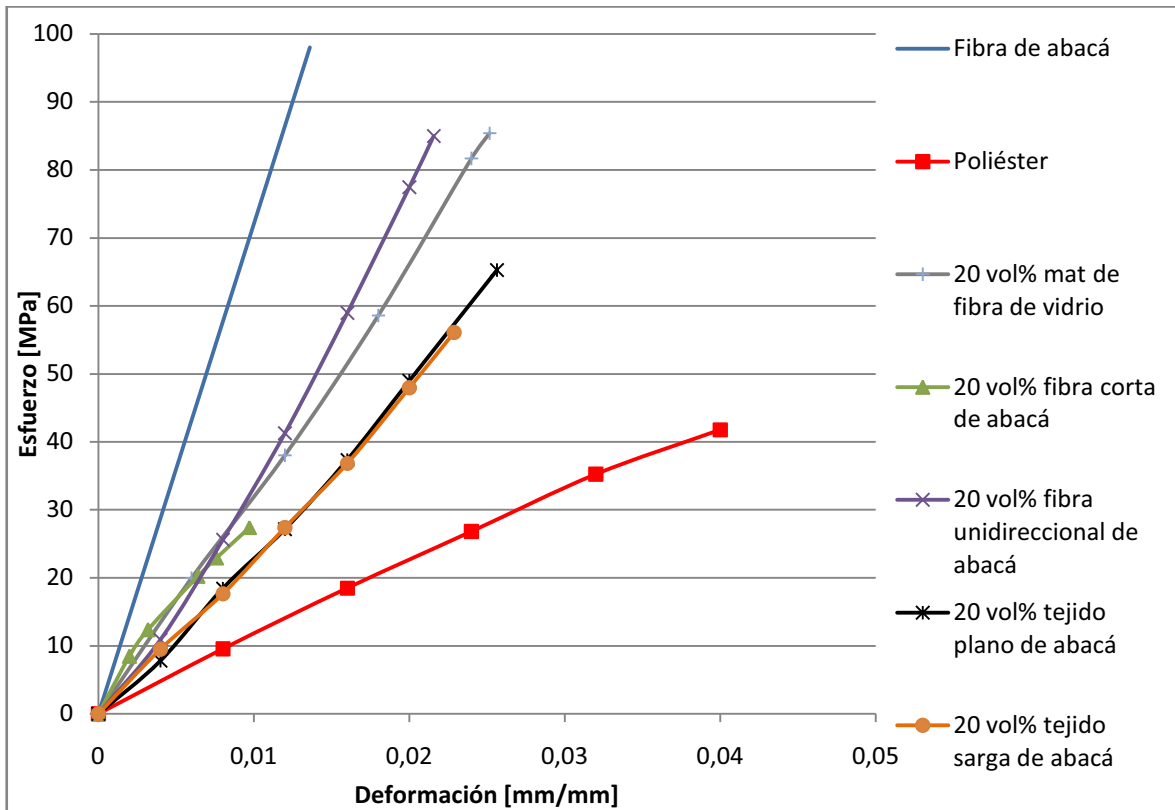
la rotura. Estas gráficas se exhiben con la finalidad de evaluar la eficiencia del refuerzo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2. Curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con distintos tipos y configuraciones de fibra. (a) Fibra de vidrio y abacá. (b) 15 vol% de refuerzo. (c) 20 vol% de refuerzo.

De las curvas expuestas se nota que los compuestos muestran un comportamiento esencialmente lineal, con excepción de los compuestos reforzados con fibra corta de abacá dispuesta aleatoriamente, en cuyo caso el comportamiento parece ser bilineal. En todas las curvas esfuerzo-deformación de las configuraciones de fibra de abacá se nota que la fracción volumétrica del 20% tiene mayor pendiente que la del 15%. La fracción del 0,2 presenta mayor esfuerzo máximo en todos los casos.

En las gráficas mostradas se puede notar el efecto del refuerzo en los compuestos, mejorando las propiedades mecánicas de la matriz. Para tener una idea de cuanto mejoran dichas propiedades de los materiales compuestos con las distintas configuraciones y fracciones volumétricas de refuerzo de fibra se definió una *eficiencia de refuerzo* asumiendo el siguiente modelo:

$$P_c = P_f v_f K + P_m v_m \quad (3.3)$$

donde: P_c : propiedad mecánica del material compuesto a analizar, P_f : propiedad mecánica de la fibra de refuerzo a analizar, v_f : fracción volumétrica del refuerzo, K : eficiencia del refuerzo, P_m : propiedad mecánica de la matriz a analizar, v_m : fracción volumétrica de la matriz.

Los valores de eficiencia de cada refuerzo junto con el resumen de las propiedades mecánicas de los distintos materiales compuestos obtenidos y ensayados se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas a tracción y eficiencia del refuerzo de distintos materiales compuestos obtenidos en la determinación de la mejor fracción volumétrica.

Refuerzo	Fracción volumétrica [%]	Esfuerzo máximo [MPa]	K_σ	Deformación a la ruptura	Módulo de elasticidad [MPa]	K_E
Mat de fibra de vidrio	15	58,07	0,038	0,0224	3547,20	1,572
	20	75,52	0,049	0,0265	3404,92	1,148
Fibra corta de abacá dispuesta aleatoriamente	15	21,97	-	0,0133	1949,60	0,399
	20	24,90	-	0,0080	2707,08	1,100
Fibra de abacá unidireccional	15	75,54	0,298	0,0227	3335,24	1,682
	20	88,59	0,300	0,0221	4270,90	1,973
Tejido plano de abacá	15	51,44	0,135	0,0243	2135,68	0,571
	20	62,14	0,165	0,0265	2384,78	0,663
Tejido sarga de abacá	15	37,44	0,039	0,0314	884,49	-
	20	58,07	0,144	0,0242	2304,24	0,607
Resina poliéster	-	37,17	-	0,0348	1786,21	-

Los resultados de K_σ para el refuerzo de mat de fibra de vidrio presentan valores bajos debido a que las fracciones volumétricas de los compuestos son bajas a relación de las que se pueden alcanzar con este tipo de refuerzo. Para este mismo parámetro, la fibra corta de abacá arrojó valores negativos lo que significa que esta configuración de fibra actúa como un concentrador de esfuerzo provocando la fractura del material prematuramente, como se indica en la figura 3.4 (b). La fibra continua unidireccional de abacá con el 20 vol% presenta mayor eficiencia en el esfuerzo máximo. Sin embargo, estos compuestos tienen mayores

propiedades solo a lo largo de la dirección longitudinal. El tejido plano muestra muy buenas propiedades aún cuando su eficiencia es menor. La ventaja radica en que los compuestos tienen las mismas propiedades en dos direcciones. En contraste, el tejido sarga exhibe eficiencia menor, esto puede explicarse por la arquitectura de las fibras en el tejido.

Los refuerzos de los compuestos presentan un comportamiento similar para K_E . En configuraciones como la de fibra corta de abacá, a pesar de que tiene un esfuerzo menor al de la matriz, tiene un módulo superior a la misma. Esto se puede deber a que el refuerzo rigidiza el material compuesto, lo cual se refleja en la menor deformación a la rotura de este compuesto en relación al poliéster.

La fabricación de los materiales compuestos es otro aspecto influyente, el cual depende de la facilidad de estratificación y obtención del refuerzo. La fibra corta de abacá resultó de fácil producción, el problema que se presentó fue al momento de distribuir las fibras de manera uniforme en el molde. La fibra continua unidireccional no presentó mayores inconvenientes cuando se laminó el compuesto, salvo que el proceso requirió de mucho cuidado para evitar que las fibras se desalineen.

En cuanto a los tejidos, la laminación del plano fue relativamente sencillo en contraste del sarga que se desagregaba al momento de cortar y estratificar debido a la disposición de las fibras. Sin embargo, la obtención de los tejidos fue un proceso laborioso, en vista de que previamente se seleccionaron las fibras, luego fueron encoladas y finalmente se elaboraron los tejidos. Los tejidos que se fabricaron eran de bajo peso por lo que se requirió de varias capas para alcanzar las cantidades necesarias para la formulación de los compuestos haciendo más laborioso el proceso.

En la figura 3.3 se muestran fotografías de las probetas ensayadas de los materiales compuestos reforzados con las distintas configuraciones y tipos de fibras.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.3. Fractura observada en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster de reforzados con: (a) Mat de fibra de vidrio. (b) Fibra corta de abacá de 10 mm dispuesta aleatoriamente. (c) Fibra continua de abacá orientada longitudinalmente. (d) Tejido plano de abacá. (e) Tejido sarga de abacá.

En la figura 3.4 se presentan acercamientos de las zonas de falla de los materiales compuestos.

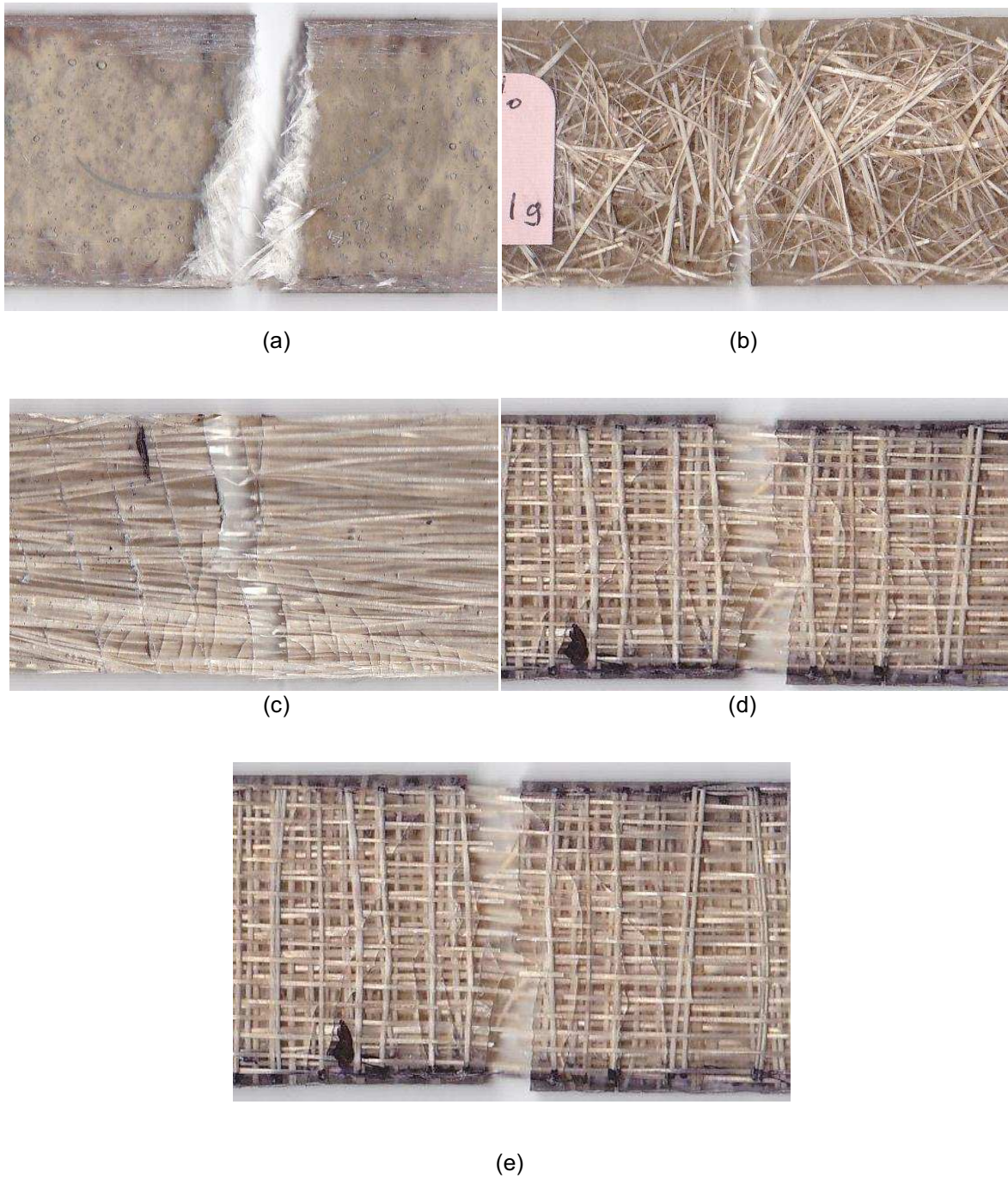


Figura 3.4. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster de reforzados con: (a) Mat de fibra de vidrio. (b) Fibra corta de abacá de 10 mm dispuesta aleatoriamente. (c) Fibra continua de abacá orientada longitudinalmente. (d) Tejido plano de abacá. (e) Tejido sarga de abacá.

Por lo observado en la figura anterior, los materiales muestran un comportamiento frágil. Para el refuerzo de mat de fibra de vidrio la falla se produjo tanto en las

fibras como en la matriz, lo que demuestra que existe una buena adhesión estos, debido a los ensimajes en la superficie de la fibra de vidrio.

En la fibra corta de abacá dispuesta aleatoriamente se nota que las fibras que no estuvieron en la dirección de la carga de ensayo actuaron como concentradores de esfuerzo. Además, se observa que la matriz en la parte central se fractura a lo largo de la dirección de la fibra que produjo la falla prematura.

En el refuerzo de fibra unidireccional de abacá se puede ver que las fibras no se rompieron, tan solo la matriz. La falla entonces se habría producido porque al fracturarse la matriz ya no existió un medio para transferir la carga. Siendo ese el caso, existe un buen potencial de mejorar las propiedades mecánicas del compuesto si se mejora la adhesión fibra-matriz.

Se nota que las fibras de los tejidos plano y sarga no se rompieron y probablemente la falla se produjo en la matriz a causa de las fibras transversales a la dirección de la carga que actuaron como concentradores de esfuerzos. En vista de que la fractura de la matriz tiene la misma dirección de las fibras mencionadas.

A continuación se presentan los análisis estadísticos agrupados por configuración de fibra de abacá, con los gráficos y datos de las medidas de dispersión calculados. Estos análisis y gráficos se obtuvieron para cada una de las propiedades mecánicas a tracción.

3.1.1.1. Esfuerzo máximo

En la figura 3.5 se presenta el gráfico de medias para el esfuerzo máximo del material compuesto de matriz poliéster reforzado con mat de fibra de vidrio, en función de sus fracciones volumétricas.

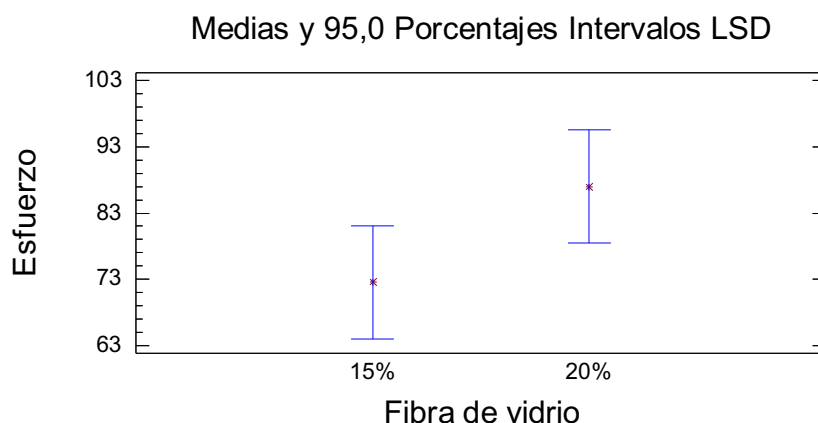


Figura 3.5. Esfuerzo máximo a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster con 15 y 20 vol% de fibra de vidrio en forma de mat.

En la tabla 3.2 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.2. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.

Fracción volumétrica de fibra de vidrio	15 vol%	20 vol%
Probeta	Esfuerzo máximo [MPa]	
1	56,07	69,21
2	72,14	74,70
3	50,70	65,40
4	64,39	80,46
5	47,04	72,83
Promedio	58,07	72,52
Desviación estándar	10,22	5,69
CV	17,6	7,84

El ANOVA permitió evidenciar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre el esfuerzo máximo promedio del material compuesto con el 15% y el del 20% de fracción volumétrica de refuerzo. Al comparar esta propiedad mecánica entre las dos formulaciones de material compuesto, se observó que los compuestos con 20 vol% de refuerzo presentaban un incremento del 19,9% con respecto a los materiales con 15 vol%.

A continuación, en la figura 3.6 se presenta el gráfico de medias para el esfuerzo máximo a la ruptura para el material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud, en función de la fracción volumétrica.

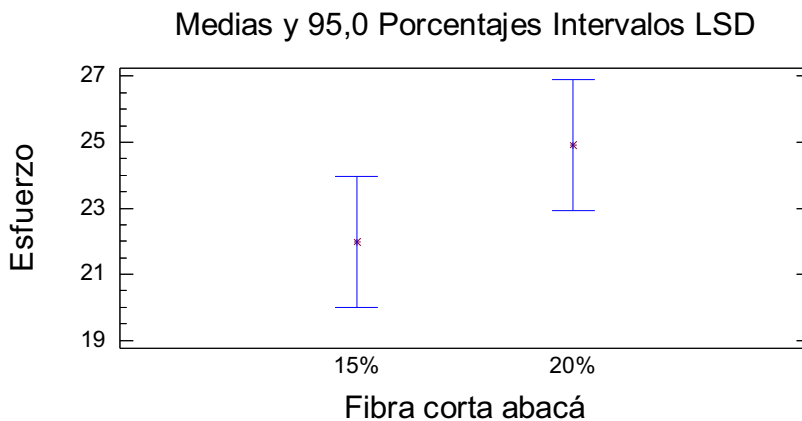


Figura 3.6. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

En la tabla 3.3 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.3. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15 vol%	20 vol%
Probeta	Esfuerzo máximo [MPa]	
1	20,33	19,41
2	23,37	27,4
3	22,46	25,00
4	24,43	26,36
5	19,26	26,36
Promedio	21,97	24,90
Desviación estándar	2,13	3,18
CV	9,71	12,79

El ANOVA permitió conocer que no existe una diferencia estadísticamente significativa del esfuerzo máximo a la ruptura para el material compuesto de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud con el 15 y 20% de refuerzo. El esfuerzo

máximo promedio en los compuestos con 0,2 de fracción volumétrica de refuerzo es un 13,34% mayor con respecto al de 0,15 de fibra.

A continuación, en la figura 3.7 se muestra el gráfico de medias para el esfuerzo máximo para los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá orientada longitudinalmente, en función de la fracción volumétrica.

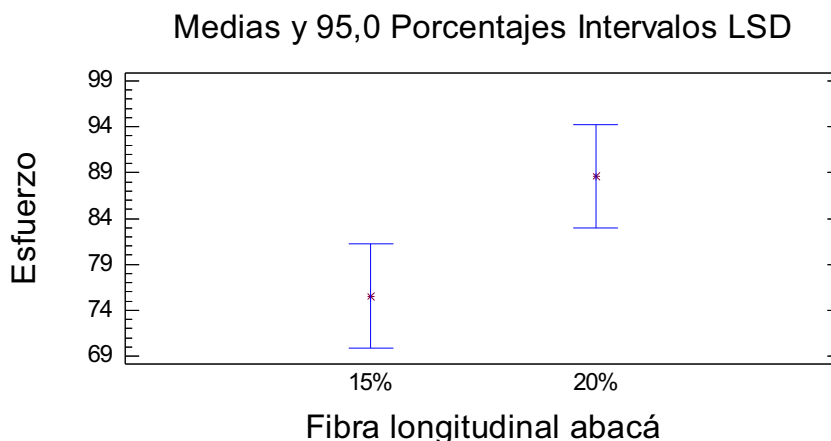


Figura 3.7. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.

En la tabla 3.4 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.4. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15 vol%	20 vol%
Probeta	Esfuerzo máximo [MPa]	
1	83,93	96,76
2	65,78	83,63
3	68,95	83,76
4	86,01	93,85
5	73,02	84,97
Promedio	75,54	88,59
Desviación estándar	9,01	6,23
CV	11,93	7,03

El análisis ANOVA indicó que existe una diferencia estadísticamente significativa del esfuerzo máximo promedio del compuesto reforzado con fibra continua unidireccional de abacá con el 15 vol% y el del material con 20 vol% de refuerzo. El incremento del esfuerzo máximo promedio de la fracción volumétrica del 0,2 fue del 17,3% respecto al del material con una fracción volumétrica de refuerzo de 0,15.

En la figura 3.8 se presenta el gráfico de medias para el esfuerzo máximo a la ruptura para el material compuesto de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá, en función de la fracción volumétrica.

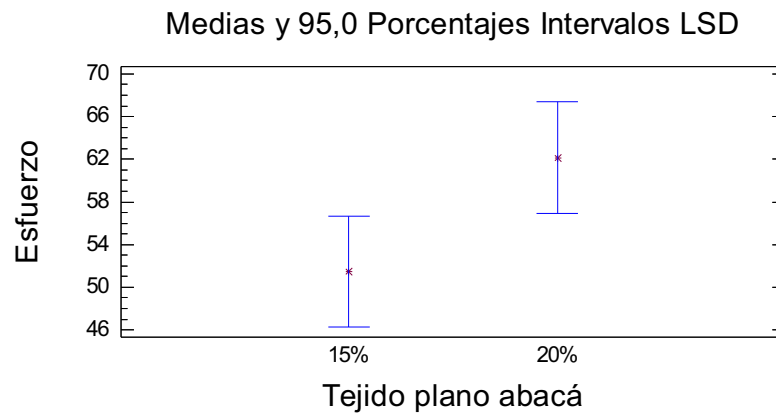


Figura 3.8. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

En la tabla 3.5 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.5. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

Fracción volumétrica	15 vol%	20 vol%
Probeta	Esfuerzo máximo [MPa]	
1	43,40	68,33
2	55,30	68,42
3	59,78	50,10
4	47,76	65,25
5	50,99	58,61
Promedio	51,44	62,14
Desviación estándar	6,38	7,82
CV	12,4	12,58

El análisis ANOVA indicó que existió una diferencia estadísticamente significativa entre el esfuerzo máximo del compuesto reforzado con tejido plano de abacá con el 15 vol% y el del material con 20 vol% de refuerzo. El incremento del esfuerzo máximo del material con la fracción volumétrica del 0,2 fue de 20,8% respecto al del material con una fracción volumétrica de refuerzo de 0,15.

En la figura 3.9 se presenta el gráfico de cajas y bigotes para el esfuerzo máximo a la ruptura para el material compuesto de matriz poliéster reforzado con tejido sarga de abacá, en función de la fracción volumétrica.

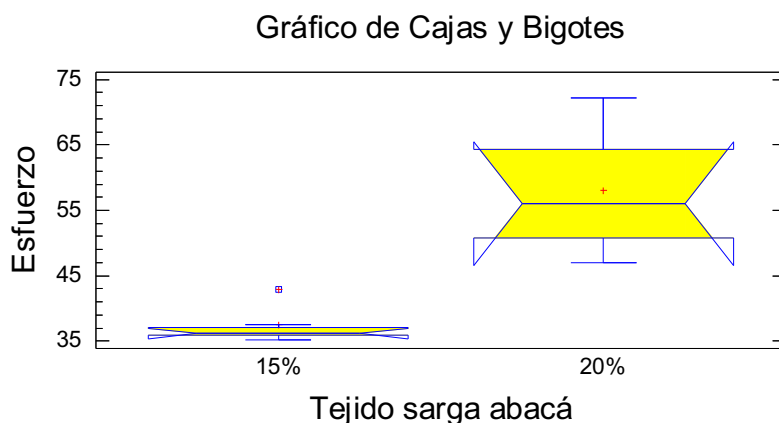


Figura 3.9. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.

En la tabla 3.6 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.6. Esfuerzo máximo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15 vol%	20 vol%
Probeta	Esfuerzo máximo [MPa]	
1	35,91	56,07
2	36,16	72,14
3	35,13	50,7
4	42,87	64,39
5	37,11	47,04
Promedio	37,44	58,07
Desviación estándar	3,12	10,22
CV	8,33	17,6

El análisis estadístico de Kruskal-Wallis mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el esfuerzo máximo del compuesto reforzado con tejido sarga de abacá con el 15 vol% y el del material con 20 vol% de refuerzo. El incremento del esfuerzo máximo del material con la fracción volumétrica del 0,2 fue del 55,1% respecto al del material con una fracción volumétrica de refuerzo de 0,15.

Los valores máximo y mínimo de la desviación estándar del esfuerzo máximo obtenidos en los ensayos preliminares fueron de 10,22 y 2,13 MPa, respectivamente. Mientras que los del coeficiente de variación fueron 17,6 y 7,03. Se puede apreciar que los valores no son demasiado altos, lo cual muestra que el procedimiento de fabricación estuvo controlado de forma adecuada por lo que los resultados son reproducibles.

3.1.1.2. Deformación a la ruptura

El análisis ANOVA permitió conocer que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las fracciones del 0,15 y 0,2 del compuesto de matriz poliéster

reforzado con fibra de vidrio. En la figura 3.10 se muestra el gráfico de medias para la deformación a la ruptura del compuesto de matriz poliéster reforzados con el 15 y 20 vol% de fibra de vidrio.

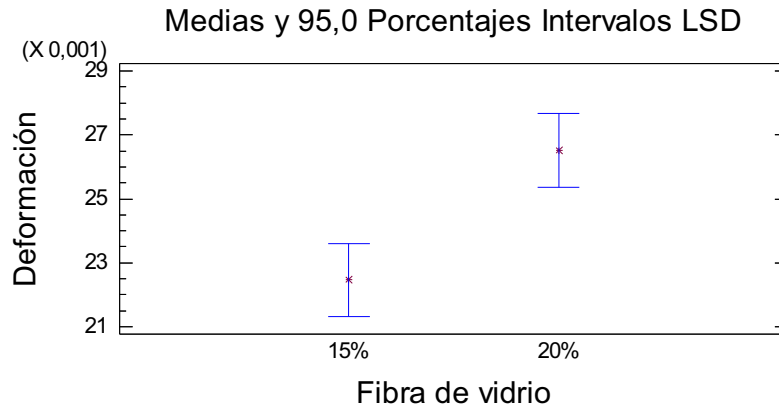


Figura 3.10. Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con el 15 y 20 vol% de fibra de vidrio.

El incremento de la deformación a la ruptura del material con la fracción volumétrica del 0,2 fue de 18% respecto a la del material con una fracción volumétrica de refuerzo de 0,15. Este comportamiento pudo presentarse debido al deslizamiento entre las mordazas y las probetas del compuesto del 0,2. Cabe señalar que tal deslizamiento no fue notorio al momento de realizar el ensayo. Sin embargo, influyó en los resultados de esta propiedad.

En la figura 3.11 se puede apreciar el gráfico de medias para la deformación a la ruptura de los materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con el 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente. El análisis ANOVA mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa de la deformación entre las fracciones volumétricas.

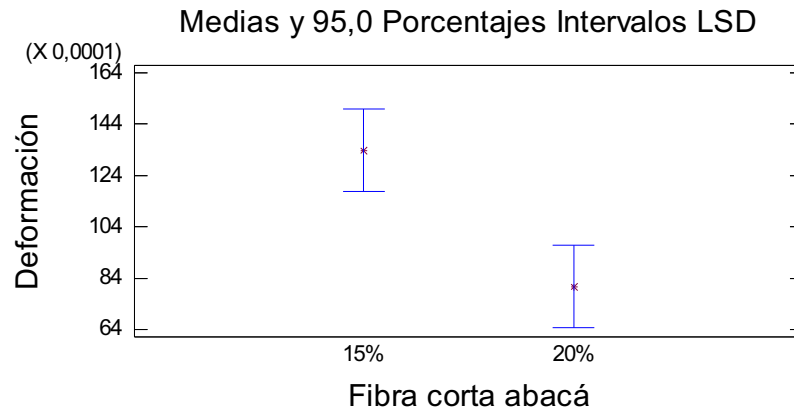


Figura 3.11. Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

La diferencia del porcentaje de elongación a la ruptura de la fracción del 0,15 fue del 18% respecto a la del 0,2. Este comportamiento se podría presentar dado que al tener menor cantidad de fibra en el material predominarían las propiedades del poliéster, el cual presenta una deformación a la ruptura del 4,5% que es superior al 3,6% que posee la fibra de abacá. Se puede notar que a la mayor cantidad de refuerzo rigidizó este material, puesto que la fracción del 0,2 muestra mayor oposición al ser estirado.

Para el porcentaje de elongación a la ruptura de las fracciones volumétricas del 0,15 y 0,2 para el material compuesto reforzado con fibra continua unidireccional de abacá y matriz poliéster, no hubo una diferencia estadísticamente significativa. En la figura 3.12 se puede apreciar el gráfico de medias para esta propiedad. Cabe resaltar que la diferencia entre las dos formulaciones de la elongación fue del 2,7%.

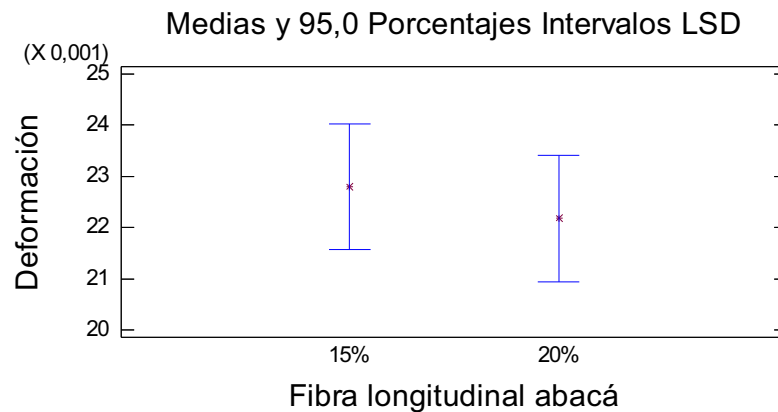


Figura 3.12. Porcentaje de deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.

En la figura 3.13 se muestra el gráfico de medias para la elongación a la ruptura de las fracciones del 0,15 y 0,2 de los compuestos de matriz poliéster reforzado con tejido plano de abacá. Para esta propiedad no existe diferencia estadísticamente significativa. El incremento en la deformación unitaria del 0,2 fue de 9,3% respecto a la del 0,15.

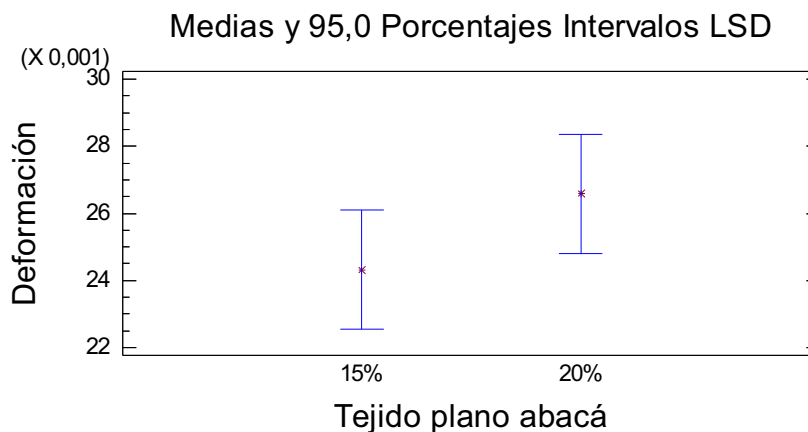


Figura 3.13. Porcentaje de deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

El análisis ANOVA mostró que hay una diferencia estadísticamente significativa del porcentaje de elongación a la ruptura entre las fracciones de refuerzo del 0,15 y 0,2 de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá. En la figura 3.14 se muestra el gráfico de medias para esta propiedad en función del porcentaje de tejido. El incremento de la deformación unitaria de la fracción del 0,15 fue del 29,4% respecto a la del 0,2.

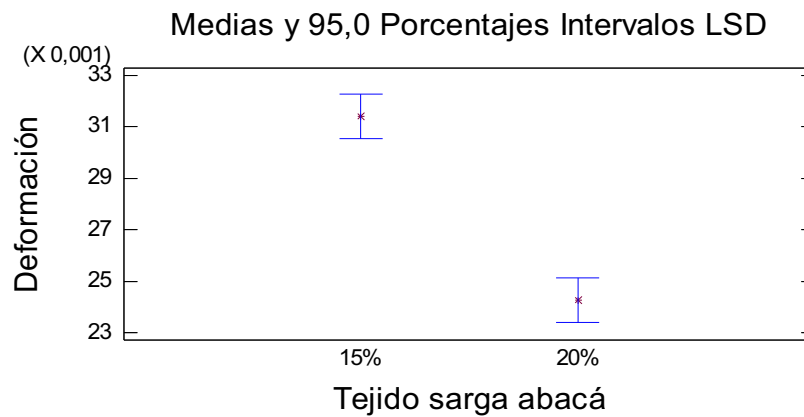


Figura 3.14. Porcentaje de deformación a la ruptura de los materiales compuestos de matriz poliéster, reforzados con tejido sarga de abacá en función de la fracción volumétrica.

Se pudo notar que el 0,15 de tejido sarga no tuvo una adhesión fuerte con la matriz, puesto que presentó una deformación elevada, lo que sugiere que el comportamiento del poliéster predominó en este compuesto. Esto puede deberse a la dificultad que se presentó en la laminación del tejido ya que por la geometría del mismo las fibras se diseminaron durante el proceso. En contraste, con el 20 vol% el material presentó mayor oposición a ser estirado, sin embargo, este valor es similar a la deformación del 15 vol% de tejido plano lo que denota que el tejido plano muestra mejores propiedades que el sarga.

3.1.1.3. Módulo de elasticidad

Se calculó el módulo de elasticidad despreciando el primero y el último punto de las curvas esfuerzo-deformación mostradas en la figura 3.2, según lo sugerido en la norma ASTM D 3039-08. Debido a la linealidad de las gráficas esfuerzo deformación se calculó un módulo para toda la curva.

En la figura 3.15 se muestra la gráfica de medias para el módulo de elasticidad de las fracciones volumétricas del 0,15 y 0,2 del compuesto de matriz poliéster reforzado con mat de fibra de vidrio. El análisis estadístico ANOVA mostró que no existe diferencia estadísticamente significativa entre el módulo de elasticidad del compuesto reforzado con mat de fibra de vidrio con el 15 vol% y el del material con 20 vol% de refuerzo. El incremento del módulo promedio del material con la

fracción volumétrica del 0,15 fue de 4,1% respecto al del material con una fracción volumétrica de refuerzo de 0,2.

Cabe señalar que los datos de deformación unitaria pudieron estar sujetos a errores porque no se tuvo un control eficaz en el deslizamiento entre las mordazas de la máquina de ensayo universal y las probetas.

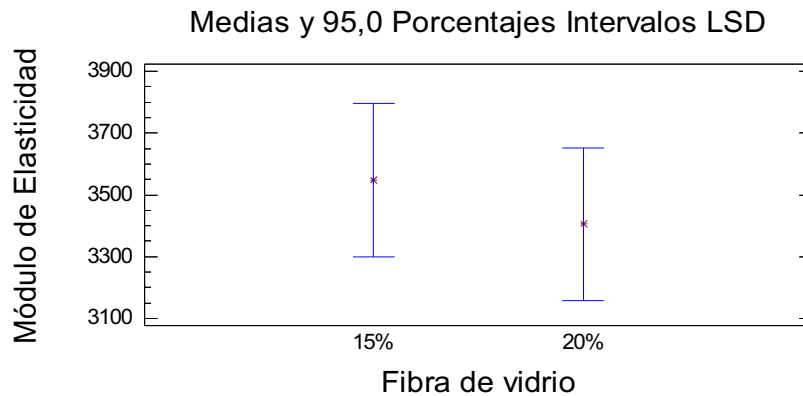


Figura 3.15. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.

En la tabla 3.7 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.7. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.

Fracción volumétrica de fibra de vidrio	15 vol%	20 vol%
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]	
1	3070,7	3989,8
2	3852	3343
3	3368,3	3146,5
4	3829,8	3133,9
5	3615,2	3411,4
Promedio	3547,2	3404,92
Desviación estándar	330,32	348,63
CV	9,31	10,23

El análisis ANOVA mostró que hay una diferencia estadísticamente significativa entre el módulo a la elasticidad del compuesto reforzado con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente con el 15 vol% y el del material con 20 vol% de refuerzo. En la figura 3.16 se muestra la gráfica de medias para esta propiedad.

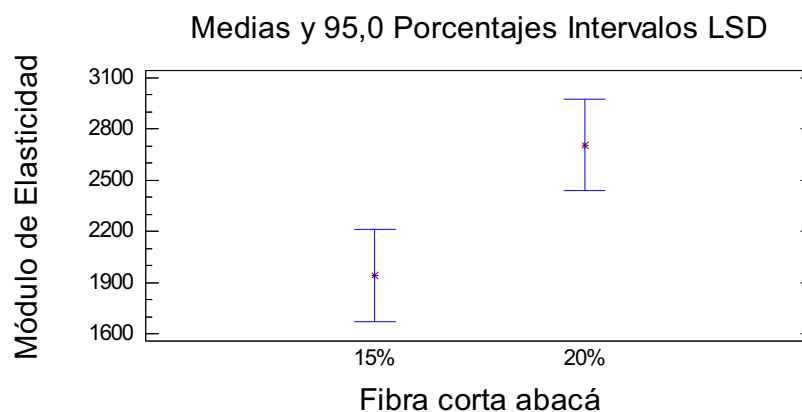


Figura 3.16. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

En la tabla 3.8 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.8. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15 vol%	20 vol%
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]	
1	2473	2806
2	2450,9	2438,8
3	1516,2	2955,4
4	1522	2492,1
5	1785,9	2843,1
Promedio	1949,6	2707,08
Desviación estándar	480,29	228,11
CV	24,63	8,42

El incremento del módulo de elasticidad del material con la fracción volumétrica del 0,2 fue de 28% respecto al del material con una fracción volumétrica de

refuerzo de 0,15. Lo que indica que una mayor cantidad de fibra de abacá como refuerzo contribuyó al aumento de la rigidez del material compuesto, por tal motivo a este material es más difícil estirarlo, lo que se puede comprobar con los resultados de deformación unitaria obtenidos.

En la figura 3.17 se muestra el gráfico de medias del módulo de elasticidad de las fracciones volumétricas del 0,15 y 0,2 del compuesto de matriz poliéster reforzados con fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá. El ANOVA mostró que hay una diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones de este material. El incremento del módulo elástico promedio del material con 0,2 de fracción volumétrica de refuerzo fue de 21,89% respecto a la del 0,15.

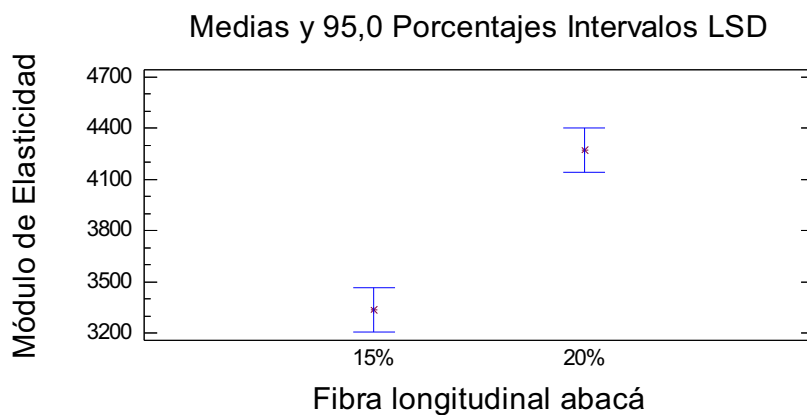


Figura 3.17. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra de abacá uniaxial orientada longitudinalmente.

En la tabla 3.9 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.9. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15 vol%	20 vol%
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]	
1	3553,8	4345,9
2	2971	4325,5
3	3330,4	4073,7
4	3370,1	4369,1
5	3450,9	4240,3
Promedio	3335,24	4270,9
Desviación estándar	220,82	120,49
CV	6,62	2,82

El análisis de Kruskal-Wallis indicó que existe diferencia estadísticamente significativa del módulo de elasticidad entre las fracciones volumétricas del 0,15 y 0,2 del material compuesto de matriz poliéster reforzado con tejido plano de abacá. En la figura 3.18 se puede apreciar el gráfico de cajas y bigotes para esta propiedad. El incremento del módulo promedio a tracción del material compuesto con 0,2 de fracción volumétrica de refuerzo fue del 11,66% respecto a la del 0,15.

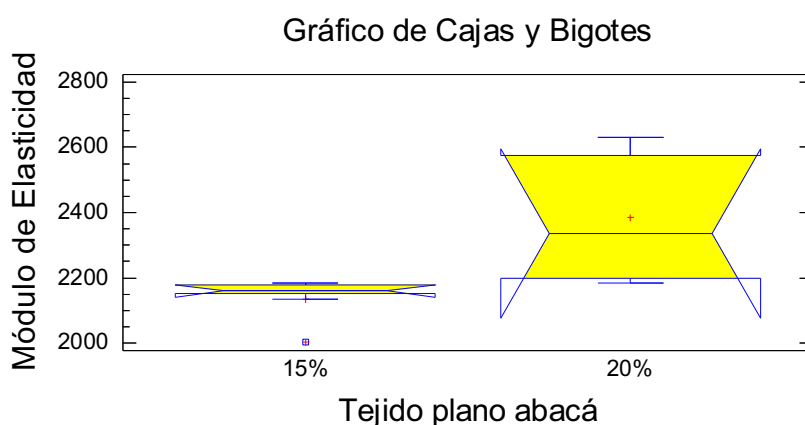


Figura 3.18. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

En la tabla 3.10 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.10. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15 vol%	20 vol%
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]	
1	2178,8	2573,7
2	2183,5	2335,3
3	2160,2	2199,5
4	2004	2631,1
5	2151,9	2184,3
Promedio	2135,68	2384,78
Desviación estándar	74,74	208,16
CV	3,5	8,72

En la figura 3.19 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo de elasticidad para las fracciones volumétricas del 0,15 y 0,2 del material compuesto de matriz poliéster reforzado con tejido sarga de abacá. El análisis de Kruskal-Wallis indicó que existe diferencia estadísticamente significativa de esta propiedad entre las formulaciones. El incremento del módulo de elasticidad promedio del compuesto reforzado con el 0,2 fue del 11,66% respecto a la del material reforzado con el 0,15.

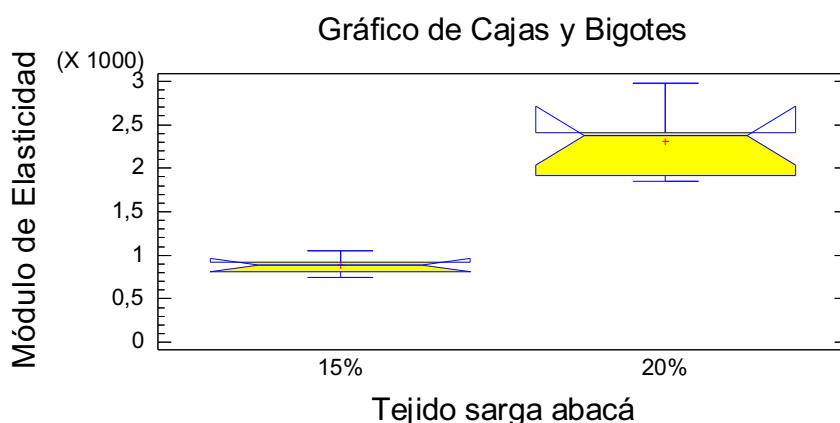


Figura 3.19. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.

En la tabla 3.11 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzado por las probetas hechas de este material.

Tabla 3.11. Módulo de elasticidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido sarga de abacá.

Fracción volumétrica de fibra de abacá	15%	20%
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]	
1	811,44	2403,4
2	887,49	2973
3	917,68	1851,4
4	749,28	2377,2
5	1056,6	1916,2
Promedio	884,498	2304,24
Desviación estándar	116,56	452,22
CV	13,17	19,62

Los valores máximo y mínimo de la desviación estándar del módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos preliminares fueron de 452,62 y 74,74 MPa, respectivamente. Mientras que los del coeficiente de variación fueron 24,63 y 2,82. Se puede apreciar que los valores no son demasiado altos, lo cual muestra que el procedimiento de fabricación estuvo controlado de forma adecuada por lo que los resultados son reproducibles.

3.1.1.4. Densidad de los materiales compuestos

En la tabla 3.12 se presenta las densidades y la fracción volumétrica real de las probetas de material compuesto. Se determinó la densidad de los materiales compuestos con el volumen de las probetas consideradas como prismas rectangulares sólidos y el peso de las mismas. Además se calculó la densidad de la resina poliéster, para lo cual se elaboró un prisma de 10x10x3 cm de este material y se registró el peso del mismo, arrojando un valor de esta propiedad de 1,18 g/cm³.

Tabla 3.12. Fracción volumétrica nominal y real, y densidad de los materiales compuestos utilizados en los ensayos preliminares.

Material compuesto	Fracción volumétrica nominal	Fracción volumétrica real	Desviación estándar	Densidad teórica [g/cm ³]	Densidad experimental [g/cm ³]	Desviación estándar
Fibra de vidrio	0,15	0,14	0,0064	1,385	1,37	0,013
	0,2	0,19	0,015	1,454	1,46	0,049
Fibra corta de abacá	0,15	0,14	0,00058	1,198	1,18	0,014
	0,2	0,17	0,011	1,204	1,27	0,147
Fibra de abacá longitudinal	0,15	0,15	0,0027	1,198	1,17	0,014
	0,2	0,17	0,011	1,204	1,14	0,032
Tejido plano de abacá	0,15	0,14	0,011	1,198	1,18	0,009
	0,2	0,18	0,018	1,204	1,19	0,045
Tejido sarga de abacá	0,15	0,14	0,0088	1,198	1,16	0,018
	0,2	0,18	0,012	1,204	1,16	0,015

La fracción volumétrica real se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{fibra} = \frac{m_{fibra}}{X_{global} V x_{parcial}}$$

donde: m_{fibra} : masa de fibra, X_{global} : fracción volumétrica global, V : volumen de la probeta, ρ_{fibra} : densidad de la fibra, $x_{parcial}$: fracción volumétrica parcial.

Las densidades de la fibra de abacá, vidrio y de la resina poliéster consideradas son: 1,3, 2,55 y 1,18 g/cm³, respectivamente.

Las fracciones volumétricas reales no llegan al valor nominal, lo cual se puede explicar por la pérdida de fibra al depositarla en el molde y a errores en el pesaje de las mismas. En cuanto a los resultados de densidad teórica y experimental, la variación puede deberse a errores en la medición de las dimensiones especialmente en los espesores de las probetas de material compuesto.

Cabe señalar que los compuestos reforzados con mat de fibra de vidrio presentan densidades superiores que la de los compuestos reforzados con fibra de abacá en

todas las configuraciones. Esto se debe a que la densidad de fibra de vidrio es mayor a la de la fibra de abacá.

En la figura 3.20 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para la densidad de las fracciones volumétricas del material compuesto de matriz poliéster reforzado con mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa en esta propiedad. El material con 0,2 de fracción volumétrica de refuerzo mostró un incremento del 6,3% en la densidad promedio respecto a la del 0,15.

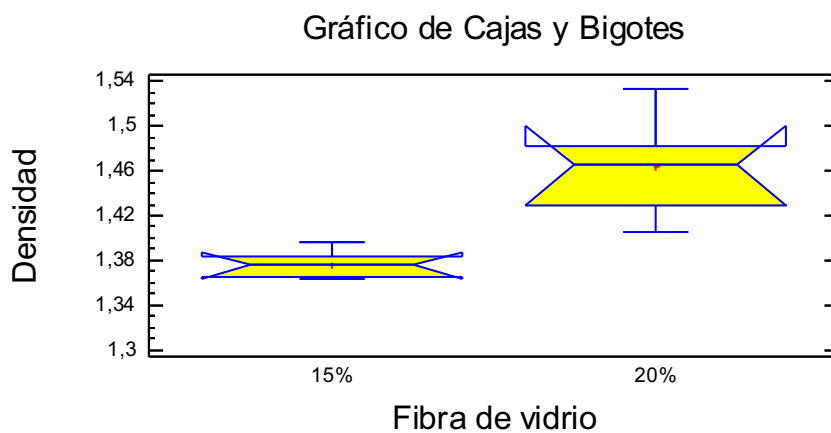


Figura 3.20. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de mat de fibra de vidrio.

El análisis de Kruskal-Wallis reveló que no hubo diferencia estadísticamente significativa de la densidad de los materiales con fracciones volumétricas del 0,15 y 0,2 del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra corta de abacá distribuida aleatoriamente. En la figura 3.21 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para esta propiedad.

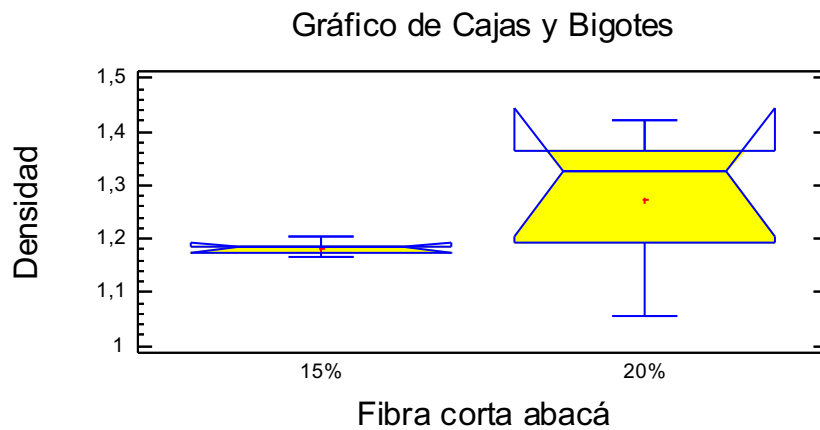


Figura 3.21. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

En la figura 3.22 se muestra el gráfico de medias para la densidad de las fracciones volumétricas del material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá. El ANOVA mostró que no existió diferencia estadísticamente significativa para esta propiedad.

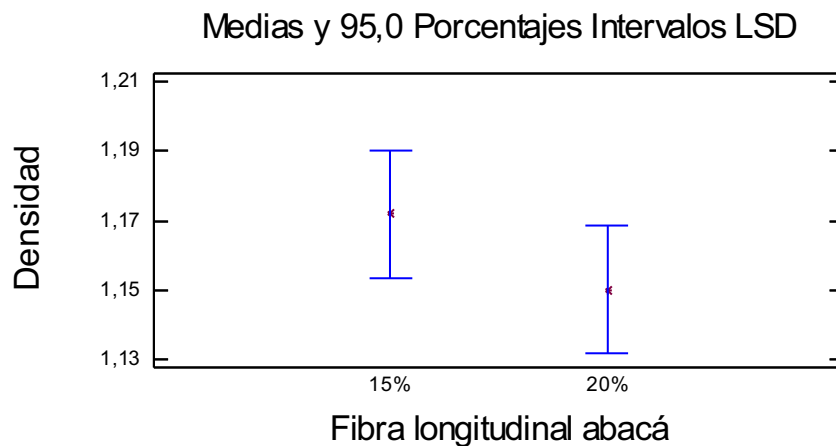


Figura 3.22. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá.

El análisis de Kruskal-Wallis indicó que no existió diferencia estadísticamente significativa de la densidad entre las formulaciones del material compuesto de tejido plano de abacá y poliéster. En la figura 3.23 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para esta propiedad en función de las fracciones volumétricas.

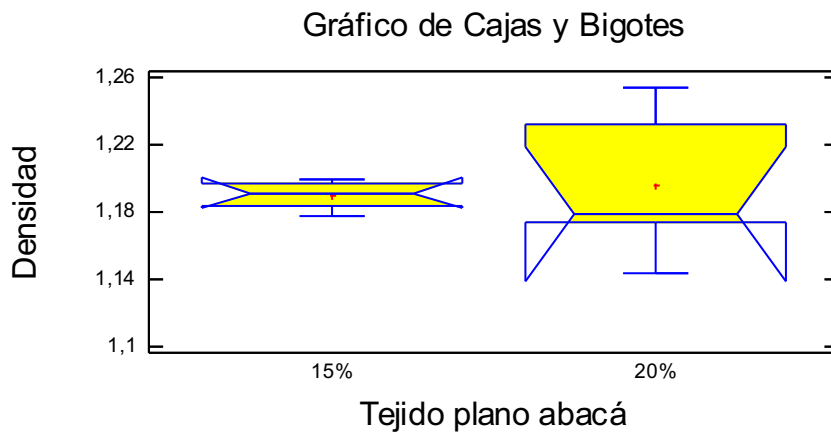


Figura 3.23. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

En la figura 3.24 se muestra el gráfico de medias para la densidad de las formulaciones del material compuesto de tejido sarga de abacá y poliéster. El ANOVA mostró que no existió diferencia estadísticamente significativa para esta propiedad entre las fracciones volumétricas del material compuesto.

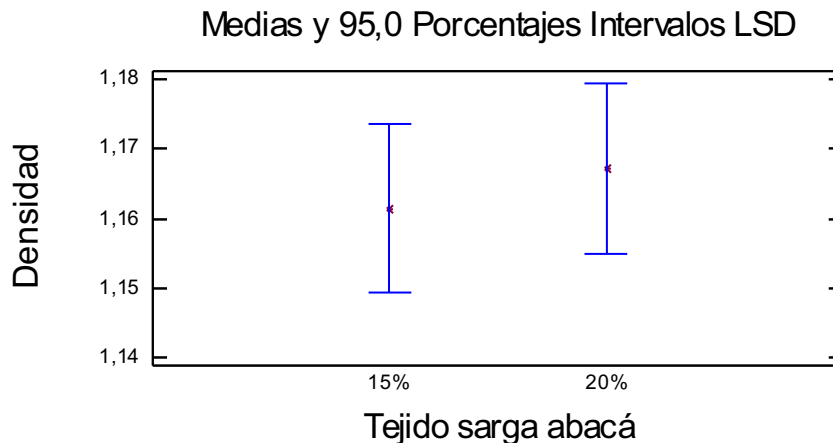


Figura 3.24. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con 15 y 20 vol% de tejido plano de abacá.

3.1.2. SELECCIÓN DE LA MEJOR FRACCIÓN VOLUMÉTRICA

Las propiedades mecánicas obtenidas con el refuerzo de fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente sugieren que no presenta un buen anclaje a la matriz, lo cual generará discontinuidades en el material provocando

que el esfuerzo no se distribuya de manera homogénea sobre el área transversal del espécimen de ensayo. Por otra parte, no se tuvo una distribución uniforme del refuerzo sobre la matriz con el método de fabricación empleado. Existieron zonas con aglomeración de fibra y ausencia de las mismas en otros sectores, siendo las zonas de aglomeración concentradores de esfuerzo e influyendo en los valores de esfuerzo máximo bajos. Sin embargo, con el incremento de la fracción volumétrica de refuerzo se produjo un aumento en el esfuerzo máximo alcanzado.

Con el refuerzo de fibra continua orientada longitudinalmente de abacá los resultados muestran un aumento significativo en el esfuerzo máximo promedio respecto al alcanzado con el refuerzo de fibra corta de abacá, puesto que la carga se aplica en la dirección en que está orientada la fibra. Sin embargo, este tipo de configuración podría presentar propiedades inferiores ante cargas transversales a la dirección de la fibra, al ser anisotrópico. Además se observó que al incrementar la fracción volumétrica de refuerzo, mejoró el esfuerzo en el material.

En cuanto al refuerzo de tejido plano de abacá los resultados muestran que hubo un incremento significativo en el esfuerzo promedio máximo a la ruptura conforme aumentó la fracción volumétrica. En comparación con la fibra longitudinal de abacá los valores de las propiedades son menores. Sin embargo, con el tejido plano se podría aplicar estados de carga biaxiales sin que se reduzca la resistencia del material en las direcciones transversal y longitudinal.

Con el refuerzo de tejido sarga de abacá se evidenció que con el incremento de la fracción volumétrica se produjo un aumento significativo en el esfuerzo máximo. La dificultad más relevante que se presentó al usar este tipo de refuerzo fue que al momento de cortar el tejido las fibras se desagregaban, debido a la disposición de las mismas. Esto provocó la pérdida de fibra durante la elaboración del material compuesto.

Al incrementar la fracción volumétrica de refuerzo de mat de fibra de vidrio se evidenció una mejoría en las propiedades mecánicas, específicamente en el esfuerzo máximo. En lo que respecta al módulo de elasticidad entre fracciones volumétricas no hubo diferencia apreciable.

De los resultados presentados se puede evidenciar que la fracción volumétrica del 20% presenta mejores propiedades mecánicas que la del 15%, en todas las configuraciones de fibra. Por ello se escogió dicha fracción para continuar con la experimentación.

3.2. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

La comparación estadística de las propiedades mecánicas entre los distintos tipos de materiales compuestos híbridos obtenidos, se realizó con base en las mismas consideraciones descritas en la sección 3.1.1. Para simplificar la identificación de las formulaciones en las figuras y tablas que se muestran en los análisis siguientes se usó una notación, la cual se muestra a continuación:

25A/75V: 25% de fibra de abacá y 75% de mat de fibra de vidrio (porcentajes en volumen).

50A/50V: 50% de fibra de abacá y 50% de mat de fibra de vidrio (porcentajes en volumen).

75A/25V: 75% de fibra de abacá y 25% de mat de fibra de vidrio (porcentajes en volumen).

FV: Mat de fibra de vidrio.

FCA: Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente.

FLA: Fibra continua orientada longitudinalmente de abacá.

TPA: Tejido plano de abacá.

TSA: Tejido sarga de abacá.

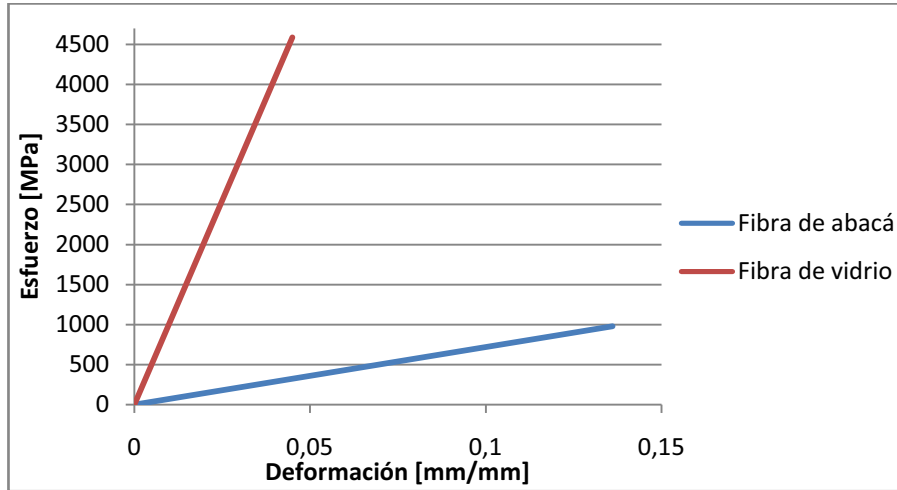
En la tabla 3.13 se resumen los valores del factor de eficiencia de refuerzo y los valores promedio de las propiedades mecánicas a tracción alcanzadas por las mejores formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.

Tabla 3.13. Propiedades mecánicas a tracción alcanzadas por las diferentes formulaciones de los materiales compuestos con 20 vol% de refuerzo híbrido.

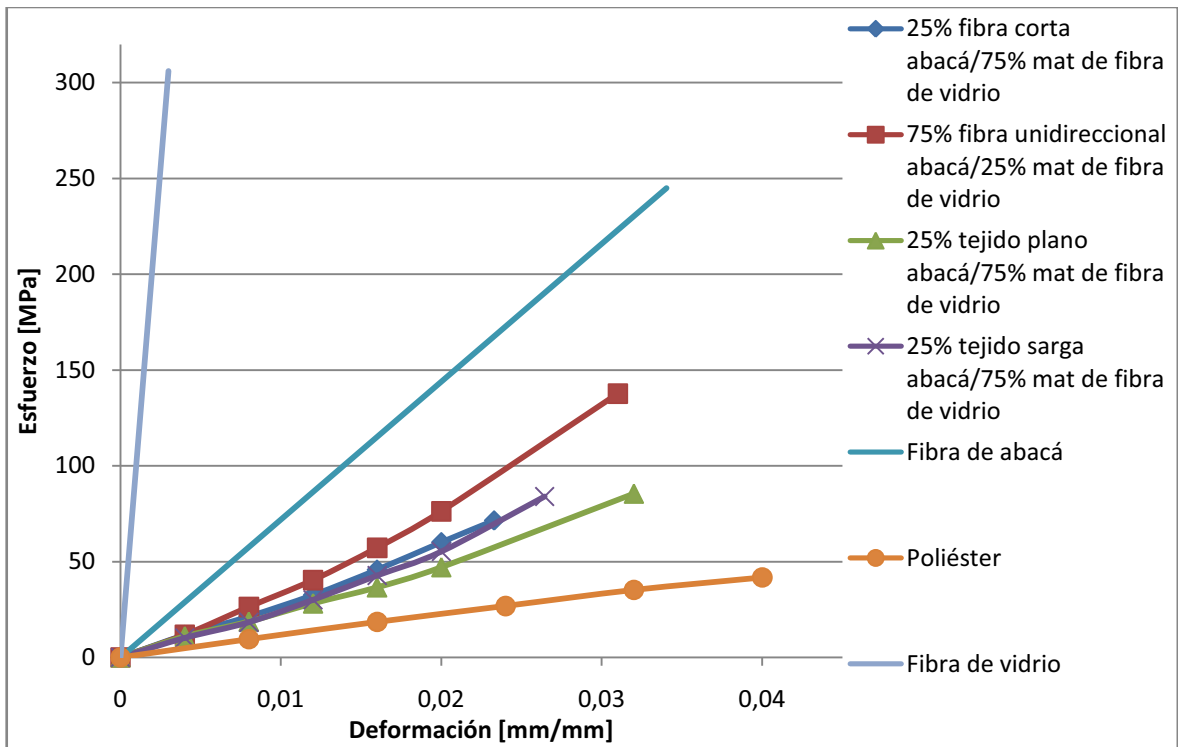
Formulaciones del compuesto híbrido	Esfuerzo máximo [MPa]	K_{σ}	Deformación a la ruptura	Módulo de elasticidad [MPa]	K_E
Fibra corta de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	69,77	0,054	0,0242	2770,38	0,812
50A/50V	54,35	0,044	0,0239	2131,92	0,444
75A/25V	32,76	0,008	0,0148	2108,76	0,450
Fibra continua unidireccional de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	115,02	0,115	0,0318	3356,62	1,168
50A/50V	93,48	0,114	0,0302	2456,60	0,650
75A/25V	137,77	0,286	0,0296	4472,60	2,015
Tejido plano de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	94,05	0,087	0,0361	2491,44	0,643
50A/50V	85,37	0,099	0,0383	2148,50	0,455
75A/25V	84,61	0,145	0,0328	2521,78	0,723
Tejido sarga de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	78,54	0,066	0,0263	2682,96	0,759
50A/50V	72,40	0,076	0,0242	2273,80	0,534
75A/25V	52,86	0,061	0,0201	2384,60	0,632

De los resultados expuestos sobresalen las propiedades mecánicas y las eficiencias del refuerzo de la formulación del 75% de fibra continua orientada longitudinalmente de abacá y 25% de mat de fibra de vidrio respecto al resto de formulaciones. Entre los otros compuestos híbridos no existe diferencia apreciable de las propiedades mecánicas. En cuanto a la facilidad de procesamiento de los compuestos híbridos no varió en relación a los compuestos fabricados en los ensayos preliminares. Además, la laminación manual del mat de fibra de vidrio en los compuestos híbridos resultó sencilla.

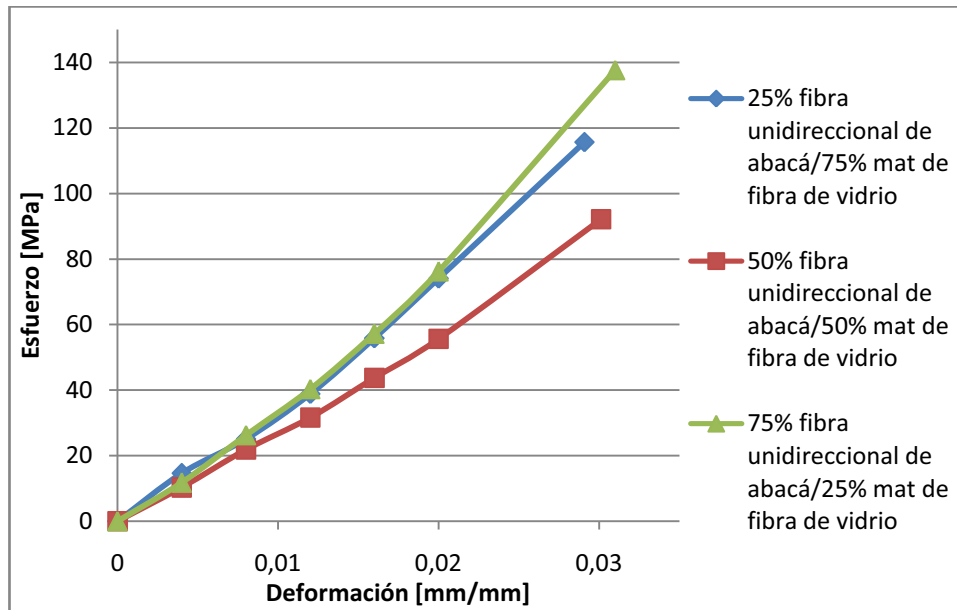
En la figura 3.25 se presenta las curvas de esfuerzo-deformación de las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá de los materiales compuestos híbridos, de la resina poliéster y de las fibras de abacá y vidrio. Cabe señalar que para poder visualizar adecuadamente esta gráfica solo se muestra la cuarta parte de la curva esfuerzo-deformación de la fibra de abacá.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.25. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción (a) Fibras de vidrio y abacá. (b) Mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio. (c) Formulaciones del compuesto híbrido reforzado con fibra continua de abacá y fibra de vidrio.

De la figura 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. Además se debe señalar las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos de tracción son fundamentalmente lineales.

Los resultados muestran que conforme se aumenta el porcentaje en volumen de mat de fibra de vidrio las propiedades mecánicas sufren un incremento en todas las configuraciones de fibra de abacá, salvo en la de fibra continua orientada longitudinalmente.

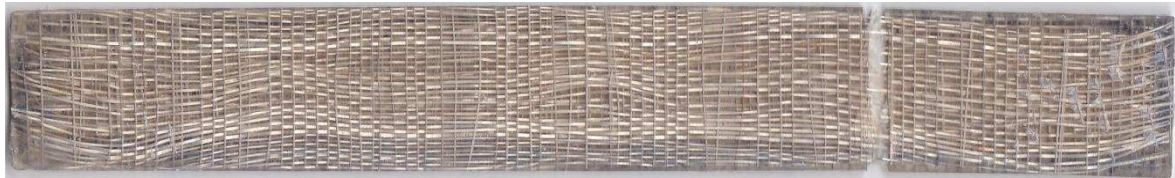
A continuación, en la figura 3.26 se muestra fotografías de las probetas de material compuesto híbrido ensayadas a tracción.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.26. Fractura observada en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.

En la figura 3.27 se muestran acercamientos de las zonas de falla de las probetas de compuesto híbrido.



(a)



(b)

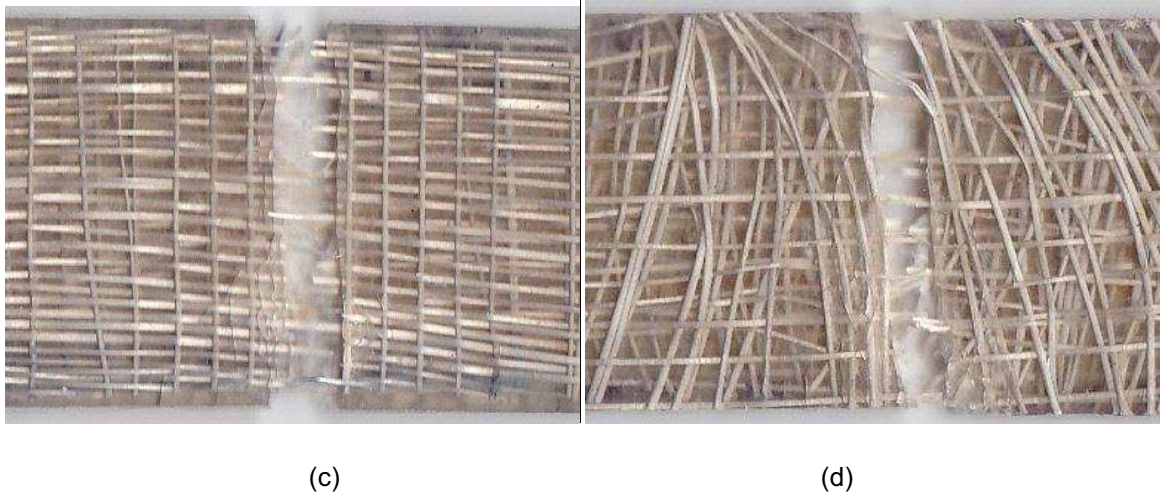


Figura 3.27. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.

Para todos los casos se nota que la falla se dio en las fibras excepto en la configuración de fibra continua de abacá, donde se visualiza una falla superficial en la matriz, a diferencia de los materiales compuestos de fibra de abacá en los que la falla se dio en la matriz. La fractura para estos materiales es frágil, esto se puede evidenciar en las curvas esfuerzo-deformación al no existir zona plástica.

El agrietamiento en los alrededores de la fractura se repite en el compuesto reforzado únicamente con fibra continua de abacá y el híbrido con esta configuración de fibra. Lo que muestra que el refuerzo que otorga a la matriz mayor resistencia. Las fallas observadas en los híbridos son similares a las de los materiales compuestos.

En la tabla 3.14 se resumen los valores de las propiedades mecánicas a flexión alcanzadas por las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.

Tabla 3.14. Valores promedio de las propiedades mecánicas a flexión alcanzadas por las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá de los materiales compuestos híbridos.

Formulaciones del compuesto híbrido	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación a la ruptura	Módulo a la flexión [MPa]	Módulo de trabajo [MPa]
Fibra corta de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	84,02	0,0421	3420,20	2241,20
50A/50V	77,48	0,0345	3603,60	2537,80
75A/25V	81,69	0,0360	3588,80	2397,00
Fibra continua unidireccional de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	116,04	0,0281	5024,20	4327,00
50A/50V	127,74	0,0300	5544,80	4517,20
75A/25V	126,73	0,0402	5091,00	3344,60
Tejido plano de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	109,13	0,0363	4109,60	3210,00
50A/50V	79,06	0,0329	2918,20	2342,00
75A/25V	79,53	0,0312	3157,20	2410,60
Tejido sarga de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	80,03	0,0350	3036,60	2307,60
50A/50V	70,97	0,0347	2749,84	2012,60
75A/25V	68,64	0,0351	2667,12	1923,20

De los resultados expuestos sobresalen las propiedades del compuesto híbrido con el 75%-25% y 50%-50% de la fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá y mat de fibra de vidrio, respectivamente. Entre el resto de formulaciones no existe diferencia apreciable. Con respecto al módulo de trabajo, en la sección 3.2.2.3 se dará una explicación más detallada sobre el cálculo de esta propiedad.

En la figura 3.28 se muestra las gráficas esfuerzo-deformación de las formulaciones según la configuración de la fibra de abacá. Se nota que dichas curvas esfuerzo-deformación presentan cierta linealidad hasta aproximadamente la mitad del valor de esfuerzo, a partir de este punto son no lineales.

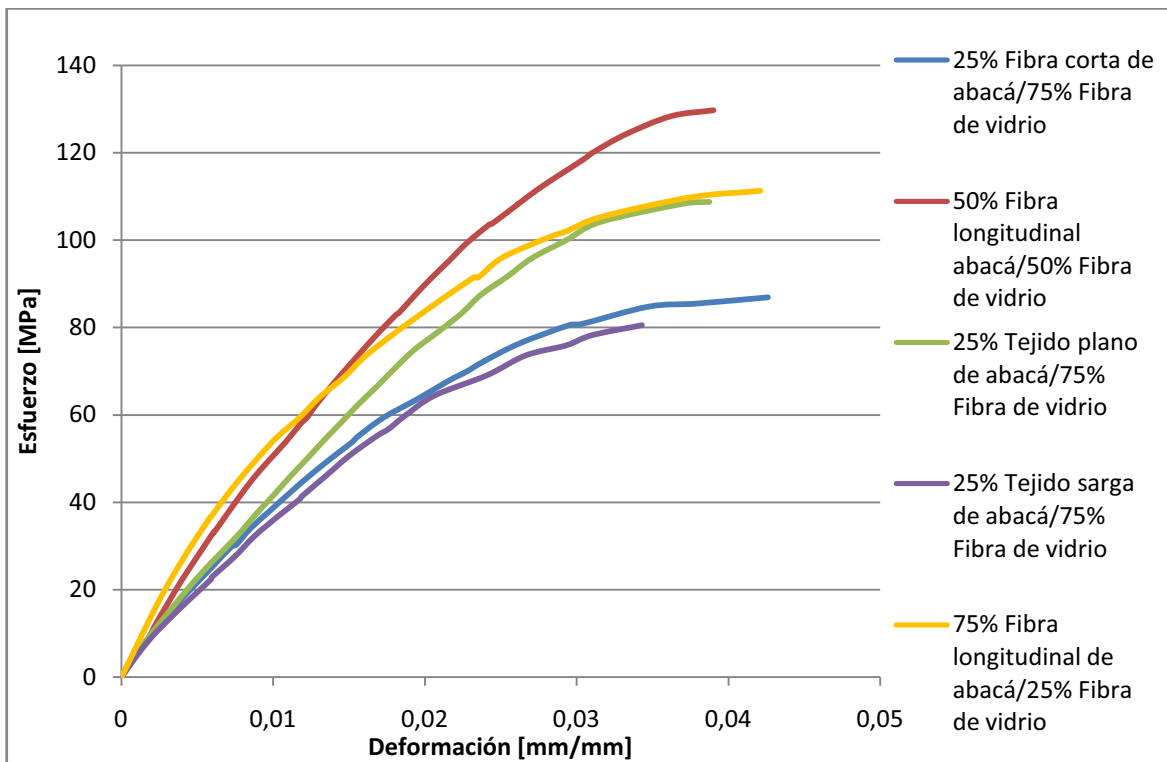


Figura 3.28. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio.

Cabe señalar que aún cuando el análisis y la presentación de los datos se hacen con referencia a formulaciones nominales, en la realidad las fracciones volumétricas reales se aproximan mucho a los valores inicialmente establecidos, estos datos se los puede observar en la sección 3.2.1.4.

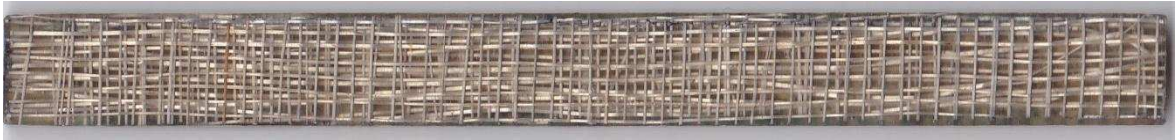
En la figura 3.29 se presentan fotografías de las probetas de material compuesto híbrido ensayadas a flexión.



(a)



(b)



(c)



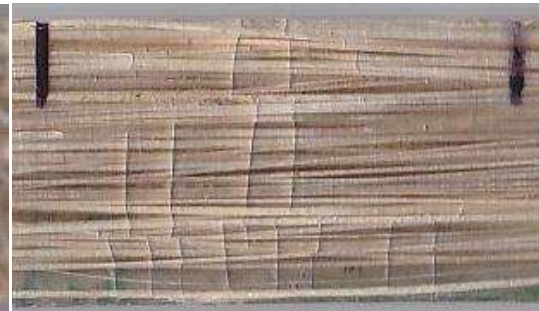
(d)

Figura 3.29. Fractura observada en probetas ensayadas a flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.

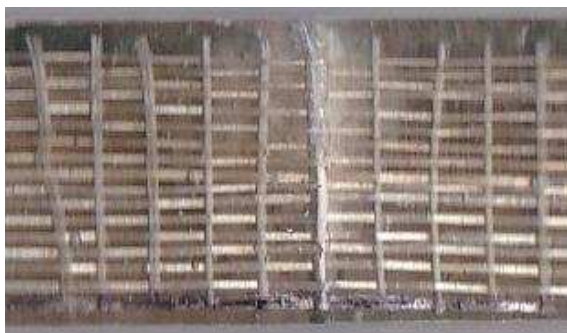
En la figura 3.30 se muestran acercamientos de las zonas de falla de las probetas de compuesto híbrido.



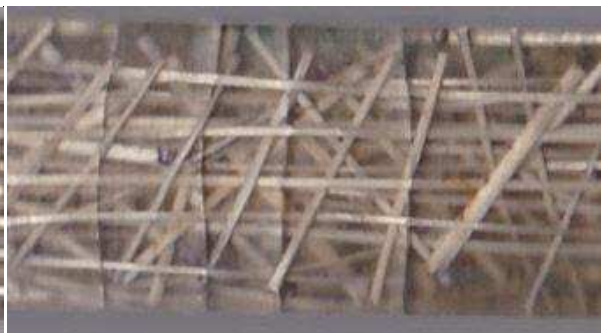
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.30. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a flexión de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.

3.2.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

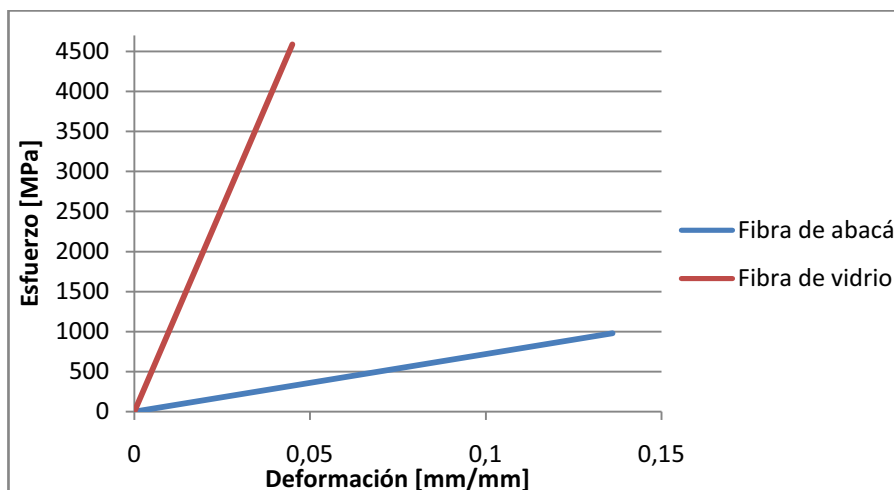
Para el análisis de las propiedades mecánicas obtenidas de este ensayo, se agruparon las formulaciones según la configuración de la fibra de abacá. Para observar el efecto del refuerzo híbrido en las propiedades a tracción se compararon los compuestos híbridos con los compuestos de fibra de vidrio y de abacá con la configuración correspondiente. Cabe señalar que se trabajó únicamente con una fracción volumétrica de refuerzo del 20%. Dentro de esta fracción se consideraron diferentes proporciones de fibra de vidrio y abacá.

En la tabla 3.15 se resumen los valores del factor de eficiencia de refuerzo y los valores promedio de las propiedades mecánicas a tracción alcanzadas por las mejores formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.

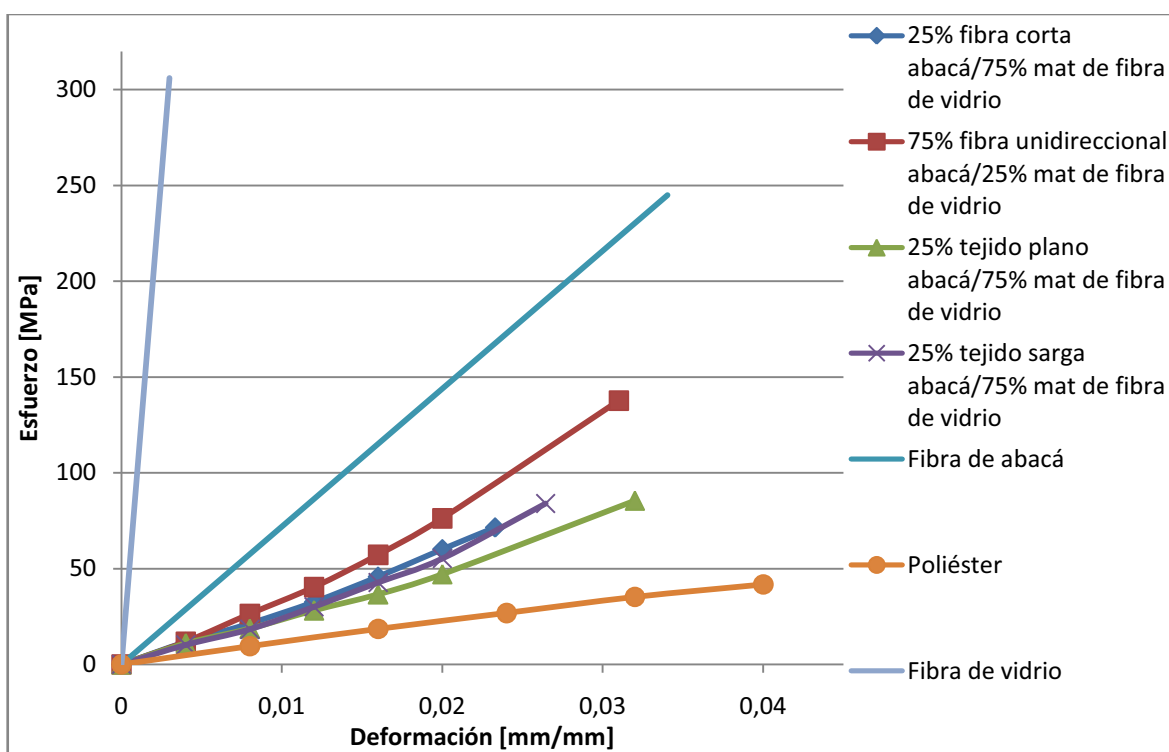
Tabla 3.15. Propiedades mecánicas a tracción alcanzadas por las diferentes formulaciones de los materiales compuestos con 20 vol% de refuerzo híbrido.

Formulaciones del compuesto híbrido	Esfuerzo máximo [MPa]	K_{σ}	Deformación a la ruptura	Módulo de elasticidad [MPa]	K_E
Fibra corta de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	69,77	0,054	0,0242	2770,38	0,812
50A/50V	54,35	0,044	0,0239	2131,92	0,444
75A/25V	32,76	0,008	0,0148	2108,76	0,450
Fibra continua unidireccional de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	115,02	0,115	0,0318	3356,62	1,168
50A/50V	93,48	0,114	0,0302	2456,60	0,650
75A/25V	137,77	0,286	0,0296	4472,60	2,015
Tejido plano de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	94,05	0,087	0,0361	2491,44	0,643
50A/50V	85,37	0,099	0,0383	2148,50	0,455
75A/25V	84,61	0,145	0,0328	2521,78	0,723
Tejido sarga de abacá/Mat de fibra de vidrio					
25A/75V	78,54	0,066	0,0263	2682,96	0,759
50A/50V	72,40	0,076	0,0242	2273,80	0,534
75A/25V	52,86	0,061	0,0201	2384,60	0,632

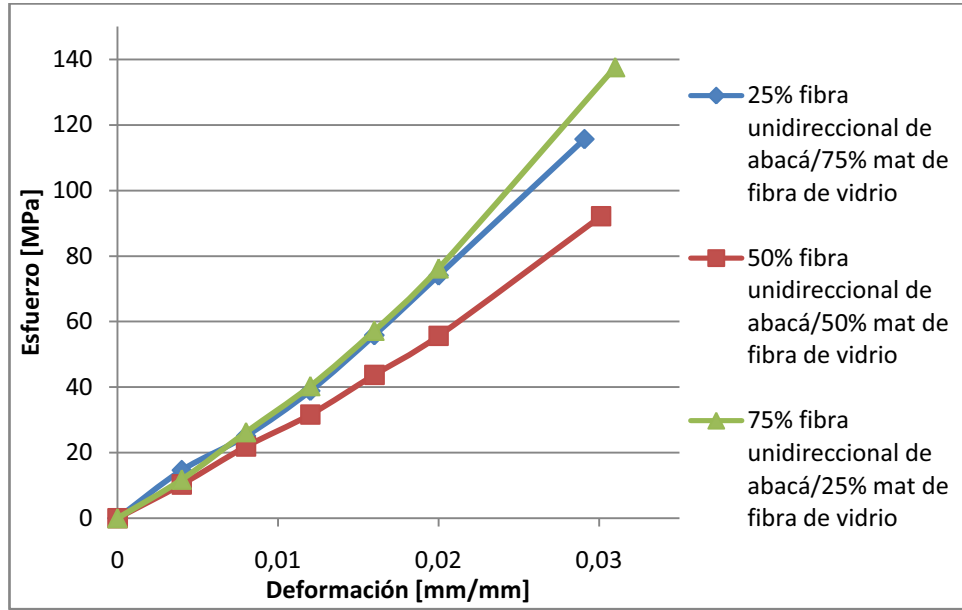
En la figura 3.31 se presenta las curvas de esfuerzo-deformación de las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá de los materiales compuestos híbridos, de la resina poliéster y de las fibras de abacá y vidrio. Cabe señalar que para poder visualizar adecuadamente esta gráfica solo se muestra la cuarta parte de la curva esfuerzo-deformación de la fibra de abacá.



(a)



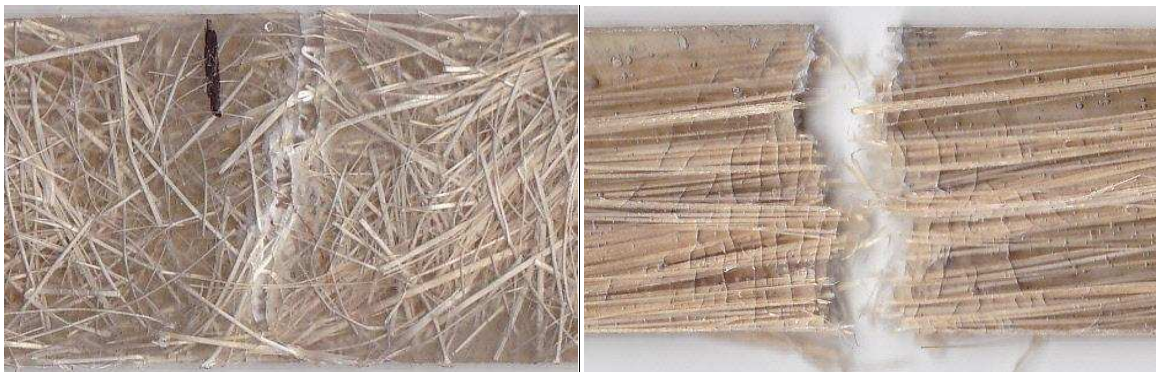
(b)



(c)

Figura 3.31. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción (a) Fibras de vidrio y abacá. (b) Mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio. (c) Formulaciones del compuesto híbrido reforzado con fibra continua de abacá y fibra de vidrio.

En la figura 3.32 se muestran acercamientos de las zonas de falla de las probetas de compuesto híbrido.



(a)

(b)

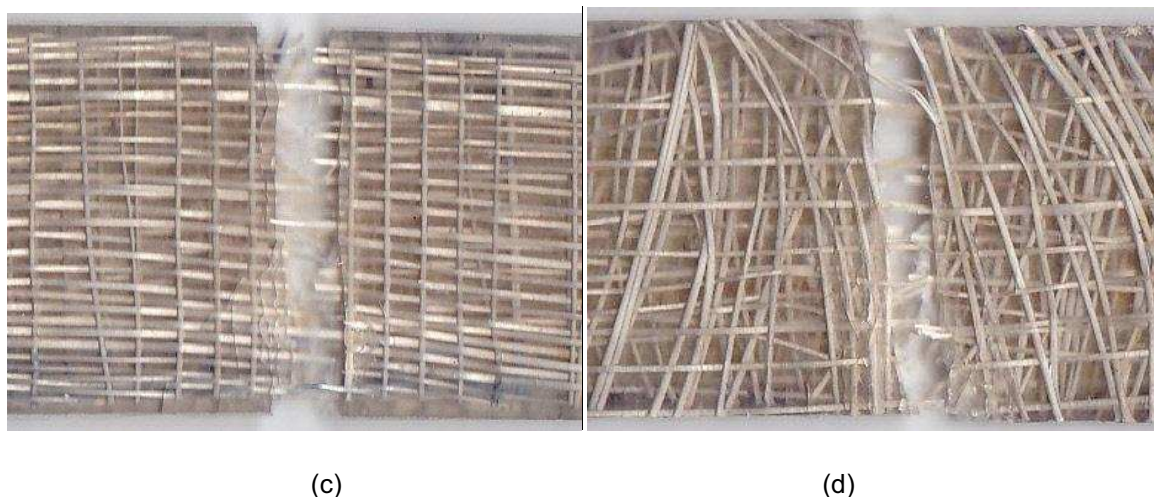


Figura 3.32. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a tracción de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.

3.2.1.1. Esfuerzo máximo

En la figura 3.33 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el esfuerzo máximo a la ruptura de las formulaciones de material compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud y mat de fibra de vidrio.

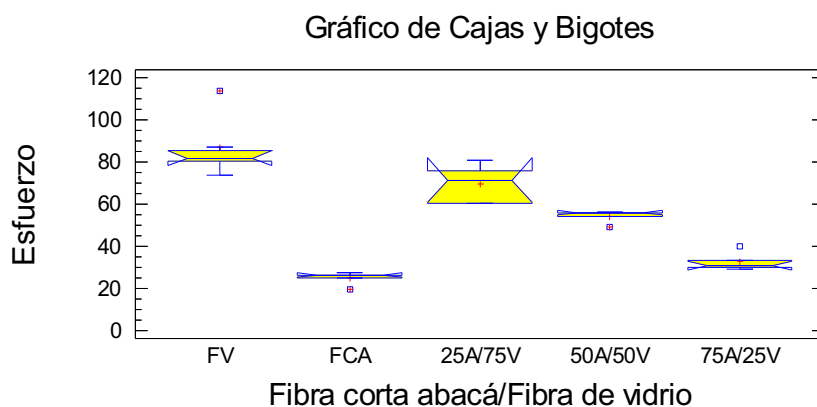


Figura 3.33. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

En la tabla 3.16 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.16. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud y fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	Fibra corta abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo [MPa]				
1	113,75	19,41	75,71	49,16	30,16
2	85,42	27,4	80,9	55,93	29,33
3	73,67	25	71,42	55,96	40,14
4	80,4	26,36	60,38	56,39	33,24
5	81,84	26,36	60,45	54,33	30,91
Promedio	87,02	24,9	69,77	54,35	32,76
Desviación estándar	15,53	3,18	9,17	3,01	4,37
CV	17,85	12,79	13,15	5,53	13,36

El análisis de Kruskal-Wallis mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa para el esfuerzo máximo a la ruptura entre las formulaciones del compuesto híbrido y el compuesto reforzado con fibra de vidrio. Del mismo análisis se conoció que existió una diferencia considerable entre el compuesto reforzado con fibra corta de abacá y las formulaciones a excepción de la del 75A/25V. Cabe señalar que entre las formulaciones existió una diferencia relevante, la mejor de ellas fue la del 25A/75V que tuvo un incremento del 180,13% respecto al compuesto de fibra corta de abacá y un decremento del 24,71% con relación al compuesto de fibra de vidrio.

Los resultados sugieren que la fibra corta de abacá no representa un buen aporte en la resistencia del material, puesto que conforme aumenta el porcentaje de fibra natural disminuye el esfuerzo máximo, presentándose el mismo fenómeno descrito en la sección 3.1.2.

En la figura 3.34 se presenta el gráfico de medias para el esfuerzo máximo de las formulaciones del material compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con fibra de vidrio y fibra continua unidireccional de abacá.

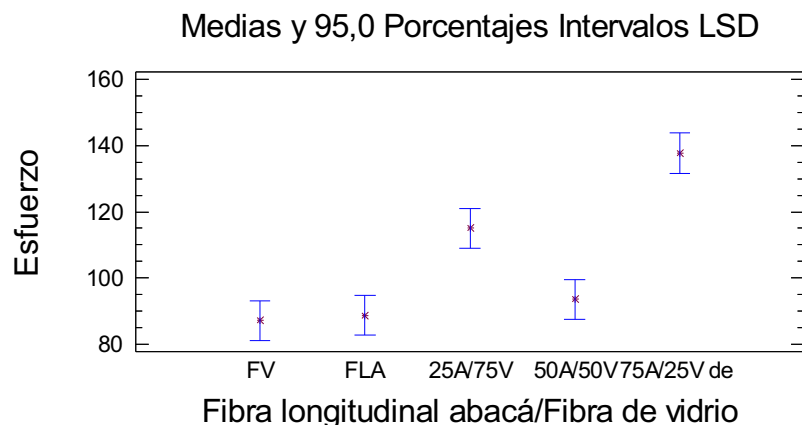


Figura 3.34. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

En la tabla 3.17 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.17. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá orientada longitudinalmente y fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	Fibra longitudinal abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo [MPa]				
1	113,75	96,76	119,81	83,23	141,23
2	85,42	83,63	115,67	102,64	125,56
3	73,67	83,76	106,86	90,62	143,51
4	80,40	93,85	111,91	98,79	140,89
5	81,84	84,97	120,83	92,13	137,68
Promedio	87,02	88,59	115,02	93,48	137,77
Desviación estándar	15,53	6,23	5,77	7,53	7,13
CV	17,85	7,03	5,02	8,06	5,18

El ANOVA mostró que hay una diferencia estadísticamente significativa para el esfuerzo máximo a la ruptura entre las formulaciones del material compuesto híbrido y los compuestos de fibra de vidrio y el de fibra longitudinal de abacá, con excepción de la formulación híbrida del 50A/50V. Entre las fracciones

volumétricas de los compuestos híbridos existieron diferencias relevantes. La mejor formulación fue la del 75A/25V que mostró incrementos del 58,32% y 55,5% en relación con los compuestos de vidrio y abacá, respectivamente.

Con este refuerzo híbrido las propiedades incrementaron ostensiblemente, debido a que la fibra de abacá en esta configuración estuvo orientada en la misma dirección de la carga, lo cual influyó en los resultados obtenidos. Sin embargo, por esta condición el material es anisotrópico por lo que ante cargas transversales a la fibra las propiedades mecánicas serían inferiores.

En la figura 3.35 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el esfuerzo máximo a la ruptura de las formulaciones del material híbrido de matriz poliéster, reforzado con fibra de vidrio y tejido plano de abacá.

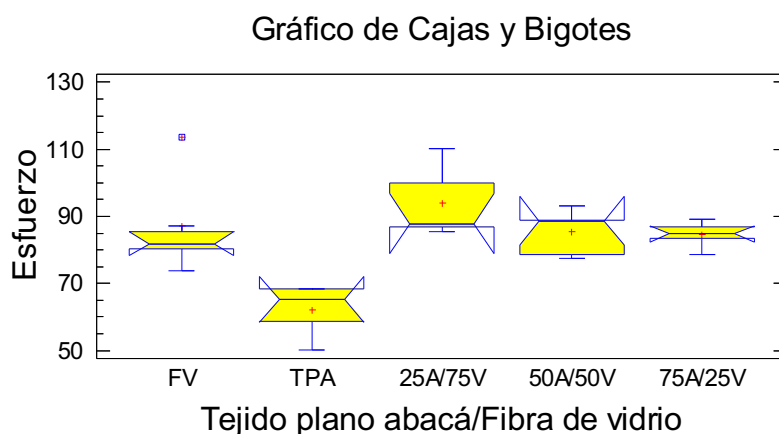


Figura 3.35. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

En la tabla 3.18 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.18. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido plano de abacá y fibra de vidrio

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	Tejido plano de abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo [MPa]				
1	113,75	68,33	85,52	88,91	86,86
2	85,42	68,42	86,88	88,68	84,86
3	73,67	50,1	99,87	78,52	83,36
4	80,40	65,25	87,86	77,58	78,71
5	81,84	58,61	110,13	93,18	89,28
Promedio	87,02	62,14	94,05	85,37	84,61
Desviación estándar	15,53	7,82	10,66	6,93	3,97
CV	17,85	12,58	11,34	8,11	4,70

El análisis de Kruskal-Wallis indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones del compuesto híbrido y el material compuesto de tejido plano de abacá, en contraste con el compuesto de fibra de vidrio donde no hubo diferencia apreciable, así como también entre las fracciones volumétricas de los híbridos.

La configuración del 25A/75V sobresalió con el mejor valor de esfuerzo de este grupo, presentando un incremento del 8% y del 51,3% en relación a los compuestos de fibra de vidrio y abacá, respectivamente.

En la figura 3.36 se presenta el gráfico de medias para el esfuerzo máximo a la ruptura de las formulaciones del material compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con tejido sarga de abacá y fibra de vidrio.

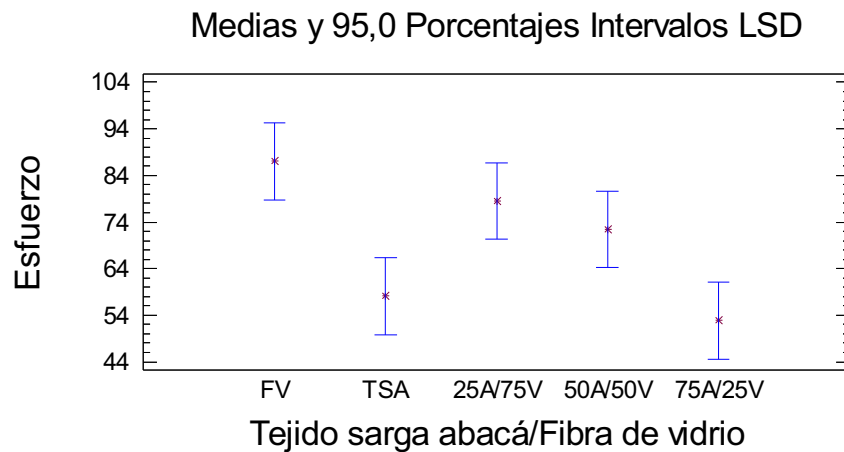


Figura 3.36. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El ANOVA mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa para el esfuerzo máximo entre la formulación del 25A/75V con el compuesto de tejido sarga y entre el compuesto con 75A/25V con el compuesto de fibra de vidrio. Entre configuraciones no hubo diferencia relevante.

La combinación 25TSA/75FV fue la de mayor valor de esfuerzo máximo a tracción entre este grupo. Tuvo un incremento del 35,2% respecto al compuesto de tejido y un decremento del 10,7% con relación al compuesto de fibra de vidrio.

En la tabla 3.19 se presentan los valores del esfuerzo máximo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.19. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido sarga de abacá y fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	Tejido sarga de abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo [MPa]				
1	113,75	68,33	75,80	47,63	54,43
2	85,42	68,42	59,15	75,26	54,30
3	73,67	50,1	83,92	81,10	50,46
4	80,4	65,25	89,85	85,62	64,31
5	81,84	58,61	84,00	72,43	40,82
Promedio	87,02	62,14	78,54	72,41	52,87
Desviación estándar	15,53	7,82	11,94	14,77	8,46
CV	17,85	12,58	15,20	20,39	16,01

Los valores máximo y mínimo de la desviación estándar del esfuerzo máximo obtenidos en los compuestos híbridos fueron de 14,77 y 4,7 MPa, respectivamente. Mientras que los del coeficiente de variación fueron 20,39 y 4,7. Se puede apreciar que los valores no son demasiado altos, lo cual muestra que el procedimiento de fabricación estuvo controlado de forma adecuada por lo que los resultados son reproducibles. Estos valores son similares a los obtenidos en la determinación de la fracción volumétrica.

3.2.1.2. Deformación a la ruptura

En la figura 3.37 se muestra el gráfico de medias para la deformación de las formulaciones del material compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud y fibra de vidrio. El ANOVA indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones híbridas y los compuestos reforzados con fibra de vidrio y fibra de abacá. Entre las fracciones volumétricas híbridas no hubo diferencia apreciable, a excepción de la que contiene el 75A/25V.

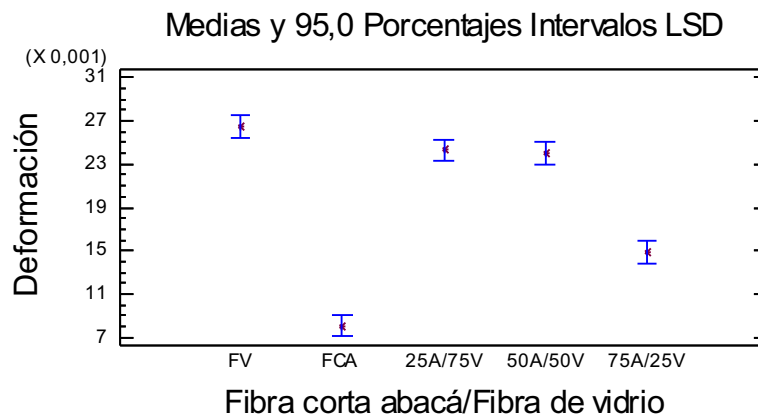


Figura 3.37. Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El ANOVA permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa para la deformación entre los compuestos híbridos y los materiales compuestos de fibra de vidrio y de fibra continua unidireccional de abacá. Sin embargo entre las formulaciones híbridas no existió diferencia apreciable. En la figura 3.38 se muestra el gráfico de medias para esta propiedad.

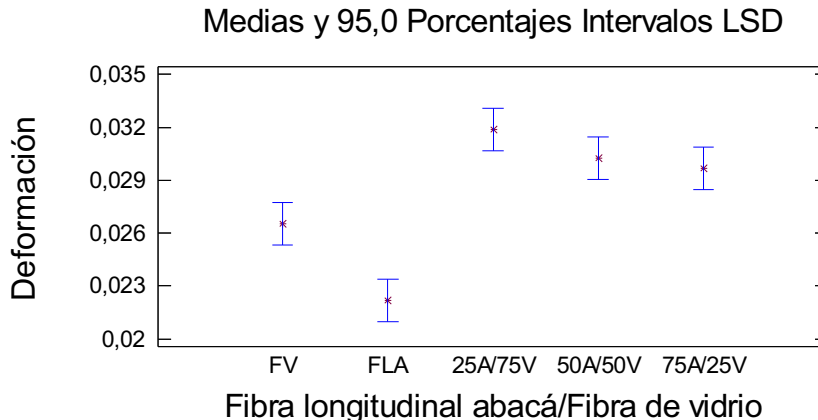


Figura 3.38. Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

En la figura 3.39 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para la deformación a la ruptura entre los compuestos híbridos y los materiales compuestos de fibra de vidrio y tejido plano de abacá. El análisis de Kruskal-Wallis indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones híbridas y los

compuestos mencionados, cabe señalar que entre los híbridos no hubo diferencia apreciable.

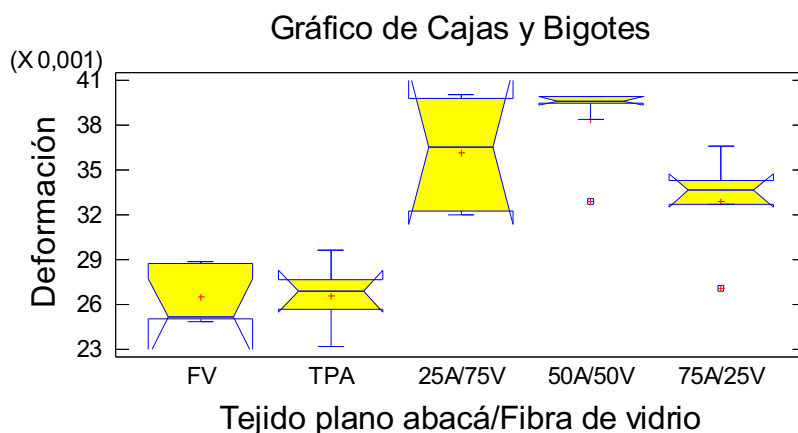


Figura 3.39. Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El análisis de Kruskal-Wallis mostró que no existe diferencia estadísticamente significativa para la deformación a la ruptura entre los compuestos híbridos y los compuestos de fibra de vidrio y tejido sarga de abacá, excepto con la fracción volumétrica del 75A/25V. Sin embargo, entre las formulaciones híbridas hubo diferencia considerable. En la figura 3.40 se presenta el gráfico de cajas y bigotes para esta propiedad.

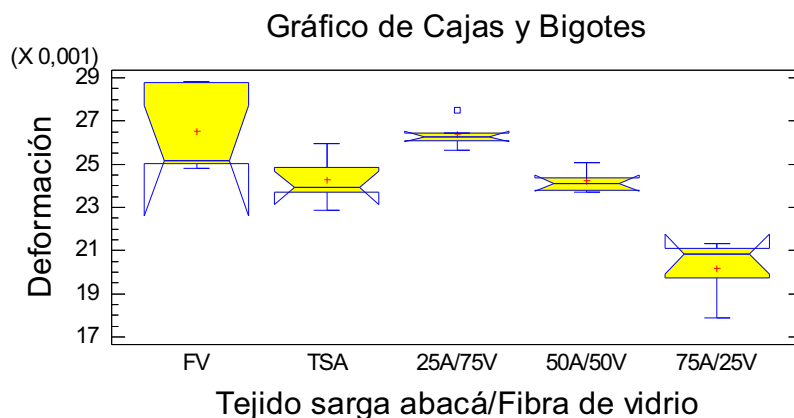


Figura 3.40. Deformación a la ruptura de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

3.2.1.3. Módulo de elasticidad

En la figura 3.41 se muestra el gráfico de medias para el módulo de elasticidad de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio. El cálculo del módulo de elasticidad se lo realizó en base a lo señalado en el acápite 3.1.1.3.

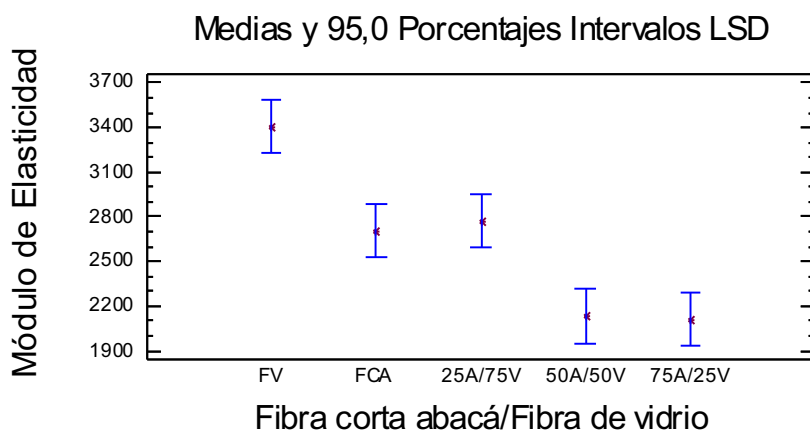


Figura 3.41. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

En la tabla 3.20 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.20. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud distribuida aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	Fibra corta de abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]				
1	3989,8	2806	3097,1	1942,3	1998,6
2	3343	2438,8	3002,9	2097,5	1924,1
3	3146,5	2955,4	3030,8	2291,4	2331,8
4	3133,9	2492,1	2361,6	1996,9	2048,7
5	3411,4	2843,1	2359,5	2331,5	2240,6
Promedio	3404,92	2707,08	2770,38	2131,92	2108,76
Desviación estándar	348,63	228,11	375,68	173,66	171
CV	10,23	8,42	13,56	8,14	8,1

El ANOVA indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones híbridas y el compuesto de fibra de vidrio. El compuesto de fibra de abacá tuvo diferencia apreciable con los híbridos excepto con la combinación del 75A/25V, entre las fracciones volumétricas restantes no hubo variación de esta propiedad.

El híbrido con el 75V/25A presentó el valor más representativo para esta propiedad, tuvo un incremento del 2,3% respecto al compuesto de fibra natural y un decremento del 22,9% con relación al compuesto de fibra sintética.

En la figura 3.42 se presenta el gráfico de medias del módulo de elasticidad para las formulaciones del material compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con fibra de abacá orientada longitudinalmente y fibra de vidrio.

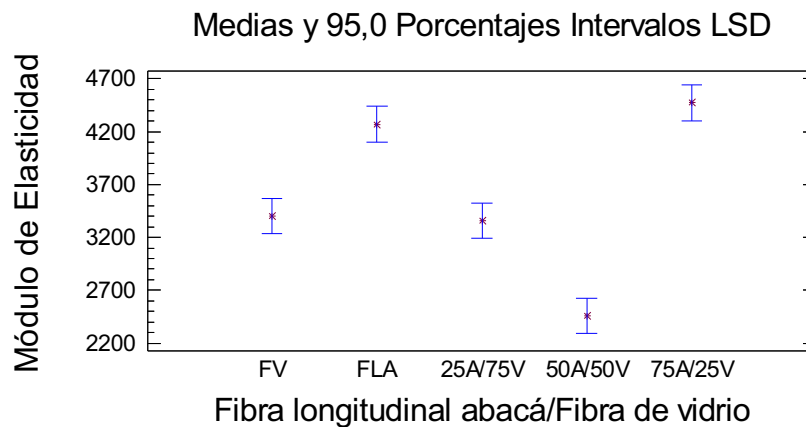


Figura 3.42. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

En la tabla 3.21 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.21. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	Fibra longitudinal de abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]				
1	3989,80	4345,90	3309,90	2301,80	4236,00
2	33430	4325,50	3626,50	2284,40	4319,70
3	3146,50	4073,70	3092,20	2669,90	4310,70
4	3133,90	4369,10	3683,60	2632,70	4834,30
5	3411,40	4240,30	3070,90	2394,20	4662,30
Promedio	3404,92	4270,90	3356,62	2456,60	4472,60
Desviación estándar	348,63	120,49	288,74	183,04	260,95
CV	10,23	2,82	8,60	7,45	5,83

El ANOVA indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos y los compuestos de fibra de vidrio y fibra longitudinal de abacá, excepto con las combinaciones del 25A/75V y 75A/25V, respectivamente. Además entre las formulaciones del material híbrido hubo diferencias apreciables.

El compuesto con el 25A/75V presentó el valor más representativo de esta propiedad, teniendo un incremento con relación a los compuestos de fibra de vidrio y fibra longitudinal de abacá del 31,35% y del 4,7%, respectivamente.

En la figura 3.43 se muestra el gráfico de medias para el módulo de elasticidad para las combinaciones del material compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con tejido plano de abacá y fibra de vidrio.

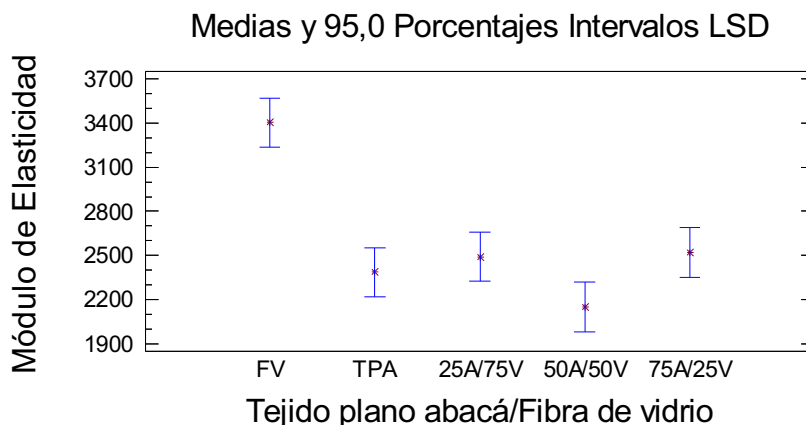


Figura 3.43. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El ANOVA permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los híbridos y el compuesto de fibra de vidrio, mientras que con el compuesto de tejido plano de abacá no hubo diferencia apreciable. Entre formulaciones no hubo diferencia apreciable, excepto la combinación del 50TPA/50FV presentó el menor valor de esta propiedad. El compuesto híbrido con el 75A/25V tuvo un incremento del 5,7% en relación al compuesto de tejido plano y un decremento del 35% respecto al de fibra de vidrio.

En la tabla 3.22 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.22. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	tejido plano de abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]				
1	3989,8	2573,7	2663,8	2238,4	2259,9
2	3343	2335,3	2135	2143	2448,3
3	3146,5	2199,5	2481,9	2246,5	2947,1
4	3133,9	2631,1	2423,5	1867,6	2309,2
5	3411,4	2184,3	2753	2247	2644,4
Promedio	3404,92	2384,78	2491,44	2148,5	2521,78
Desviación estándar	348,63	208,16	239,72	163,03	280,67
CV	10,23	8,72	9,62	7,58	11,12

En la figura 3.44 se muestra el gráfico de medias para el módulo de elasticidad de las formulaciones del compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con tejido sarga de abacá y fibra de vidrio.

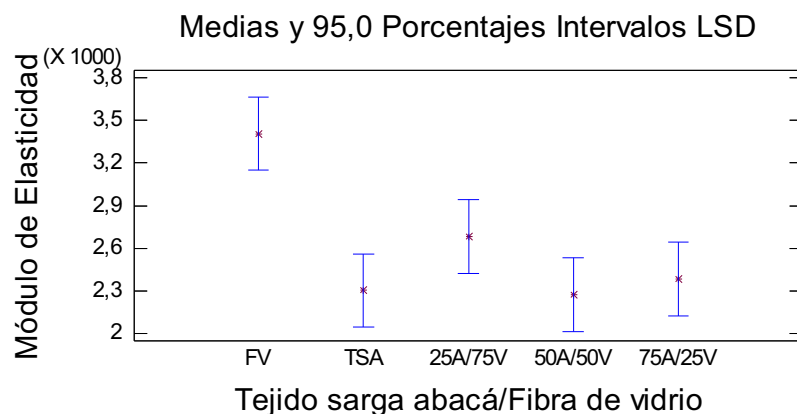


Figura 3.44. Módulo de elasticidad a tracción de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El ANOVA permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa para el módulo de elasticidad entre los materiales híbridos y el compuesto de fibra de vidrio, mientras que con el compuesto de tejido sarga no hubo diferencia, así como también entre las formulaciones híbridas.

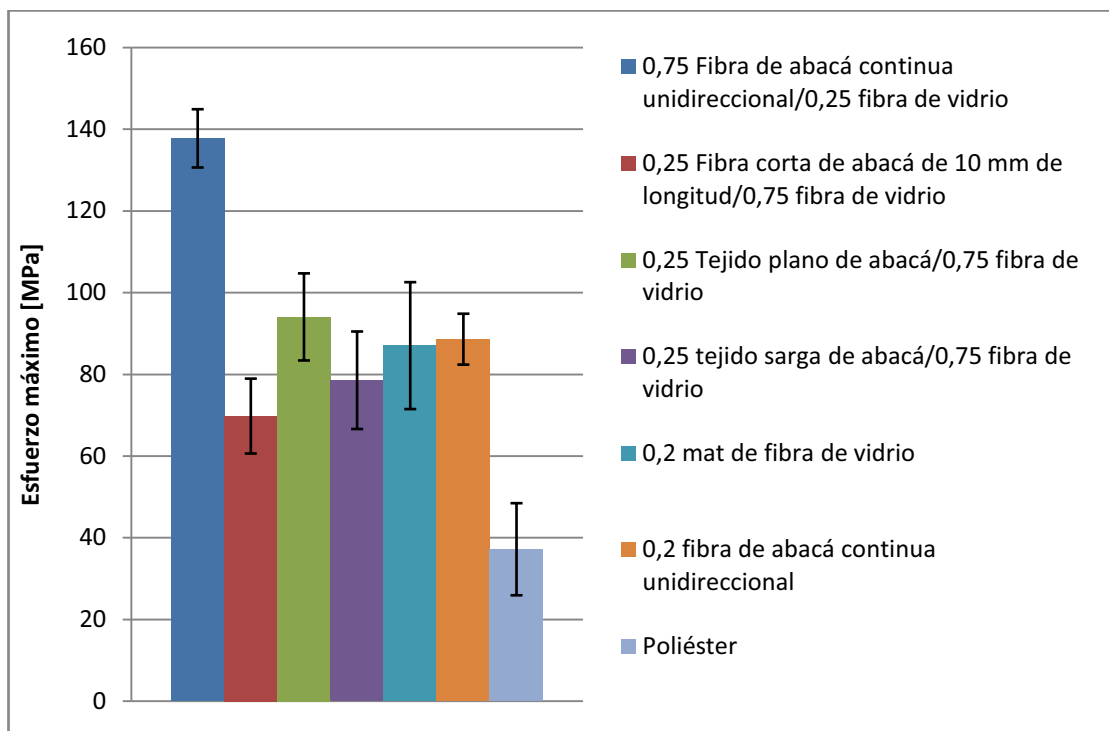
La combinación con el 25A/75V presentó el mayor valor de esta propiedad, tuvo un incremento del 16,4% respecto al compuesto de tejido de fibra natural y un decremento del 26,9% en relación al compuesto de fibra de vidrio.

En la tabla 3.23 se presentan los valores del módulo de elasticidad a tracción alcanzados por estos materiales.

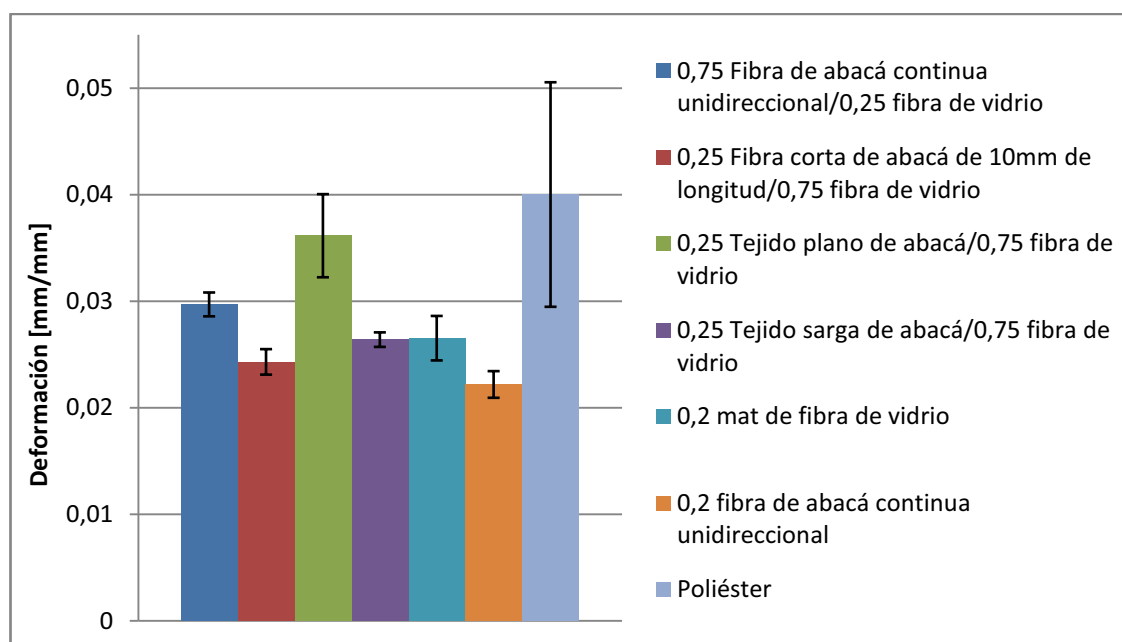
Tabla 3.23. Módulo de elasticidad de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Fibra de vidrio	tejido sarga de abacá	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo de elasticidad [MPa]				
1	3989,8	2403,4	2423,4	1537	2328
2	3343	2973	2116,5	2187	2494
3	3146,5	1851,4	2936	2616	2254
4	3133,9	2377,2	3072,1	2654	2782
5	3411,4	1916,2	2866,8	2375	2065
Promedio	3404,92	2304,24	2682,96	2273,8	2384,6
Desviación estándar	348,63	452,22	399,21	453,4	270,32
CV	10,23	19,62	14,87	19,94	11,33

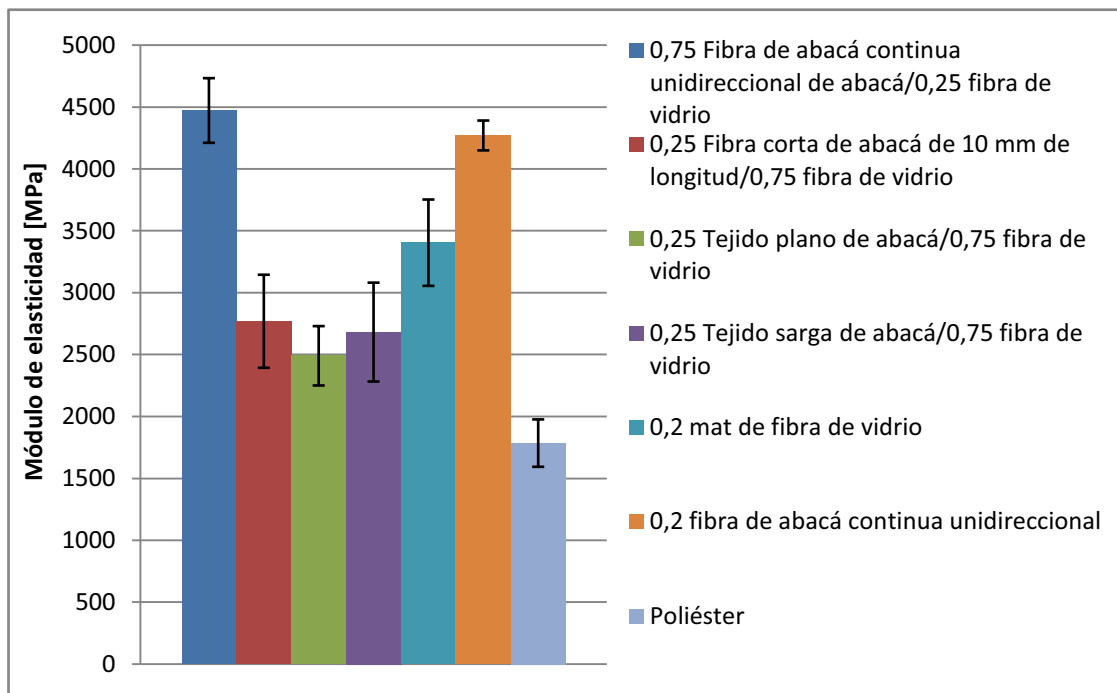
De los resultados se observó una diferencia considerable en el esfuerzo máximo a la ruptura y el módulo de elasticidad entre la fibra orientada longitudinalmente y el resto de formulaciones. Sin embargo, en la deformación presentó un valor inferior, esto se puede explicar por la rigidez que adquirió el material con este tipo de refuerzo, reflejada en el módulo de elasticidad elevado. Esto se puede observar en los gráficos de barras de error con desviación estándar mostrados en la figura 3.45 para el esfuerzo máximo, deformación a la ruptura y el módulo de elasticidad.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.45. Propiedades mecánicas a tracción de las mejores formulaciones de cada configuración de abacá. (a) Esfuerzo máximo. (b) Deformación a la ruptura. (c) Módulo de elasticidad.

3.2.1.4. Densidad de los materiales compuestos híbridos

La determinación de la densidad de las probetas de tracción de los materiales compuestos híbridos se la realizó tomando en cuenta las mismas consideraciones mencionadas en el acápite 3.1.1.4. En la tabla 3.24 se presenta las densidades, la fracción volumétrica nominal y real y las desviaciones estándar de las probetas de material compuesto híbrido.

Los valores de la fracción volumétrica real se aproximan a los nominales, lo cual se puede atribuir a errores en el pesaje de los refuerzos y por pérdida de fibras al depositarlas en el molde y al comprimirlo en la prensa. Sin embargo, los valores de la desviación estándar son bajos, lo que indica que se tuvo control en el proceso de fabricación de las probetas.

Las densidades de los compuestos híbridos son mayores a la de los materiales compuestos reforzados únicamente con fibra de abacá. Esto se debe a la

presencia de la fibra de vidrio, la cual tiene aproximadamente el doble de la densidad de la fibra de abacá. Razón por la cual se evaluó esta propiedad con la finalidad de observar como varia la densidad en función del porcentaje en volumen de fibra de vidrio en los compuestos híbridos.

Tabla 3.24. Fracción volumétrica nominal y real, y densidad de los materiales compuestos híbridos.

Material compuesto híbrido	Formulación de compuesto híbrido	Fracción volumétrica real	Desviación estándar	Densidad teórica [g/cm ³]	Densidad experimental [g/cm ³]	Desviación estándar
Fibra corta de abacá/Fibra de vidrio	0,25A/0,75V	0,21	0,005	1,391	1,43	0,09
	0,50A/0,50V	0,18	0,012	1,329	1,31	0,03
	0,75A/0,25V	0,17	0,004	1,266	1,24	0,004
Fibra longitudinal abacá/ Fibra de vidrio	0,25A/0,75V	0,21	0,008	1,391	1,39	0,005
	0,50A/0,50V	0,18	0,013	1,329	1,35	0,02
	0,75A/0,25V	0,20	0,008	1,266	1,25	0,011
Tejido plano de abacá/ Fibra de vidrio	0,25A/0,75V	0,20	0,007	1,391	1,41	0,045
	0,50A/0,50V	0,19	0,008	1,329	1,30	0,015
	0,75A/0,25V	0,19	0,007	1,266	1,25	0,018
Tejido sarga de abacá/ Fibra de vidrio	0,25A/0,75V	0,19	0,011	1,391	1,40	0,013
	0,50A/0,50V	0,20	0,011	1,329	1,30	0,041
	0,75A/0,25V	0,19	0,011	1,266	1,26	0,028

En la figura 3.46 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para la densidad de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá y vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los híbridos y el compuesto de fibra de vidrio, excepto al del 25A/75V. Esta formulación fue la única que tuvo diferencia considerable con el compuesto de fibra corta. Entre las combinaciones del 50A/50V y 75A/25V fibra de vidrio no hubo diferencia apreciable.

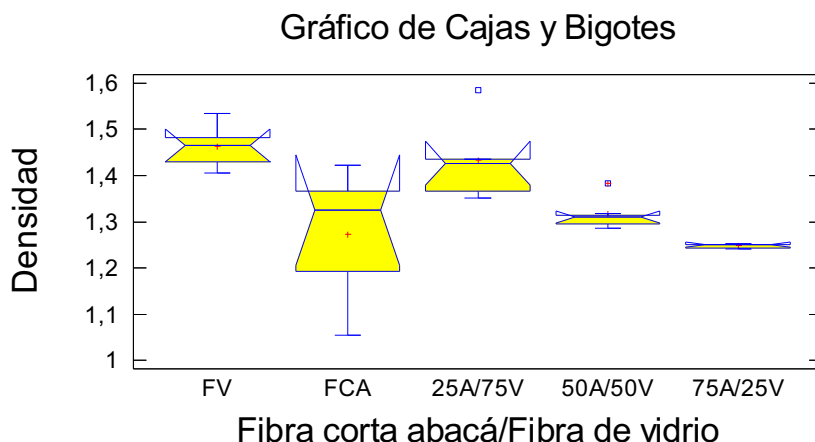


Figura 3.46. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

La figura 3.47 se presenta el gráfico de cajas y bigotes para la densidad de los compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá orientada longitudinalmente y fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los híbridos y los compuestos de fibra sintética y fibra natural, así como también entre las formulaciones híbridas.

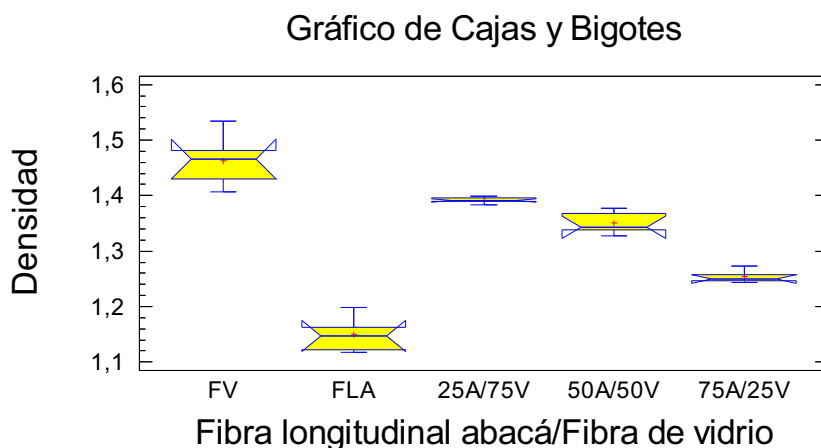


Figura 3.47. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El análisis de Kruskal-Wallis indicó que existe diferencia estadísticamente significativa para esta propiedad entre los compuestos híbridos y el material compuesto de tejido plano de abacá, así como también con el compuesto de fibra de vidrio excepto con el híbrido del 25A/75V. Entre las formulaciones hubo

diferencia considerable. En la figura 3.48 se presenta el gráfico de cajas y bigotes para la densidad de los materiales mencionados.

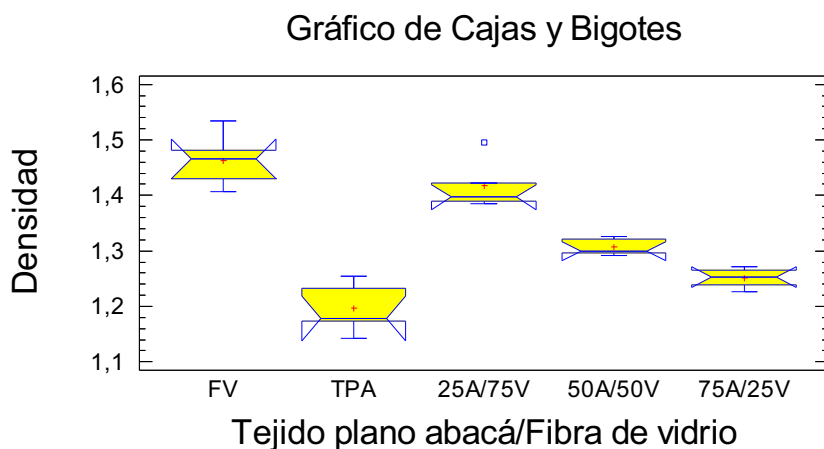


Figura 3.48. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

El análisis de Kruskal-Wallis indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos y los compuestos de tejido sarga de abacá y fibra de vidrio. Entre formulaciones híbridas también hubo diferencia excepto entre las combinaciones del 50A/50V y 75A/25V. En la figura 3.49 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para esta propiedad.

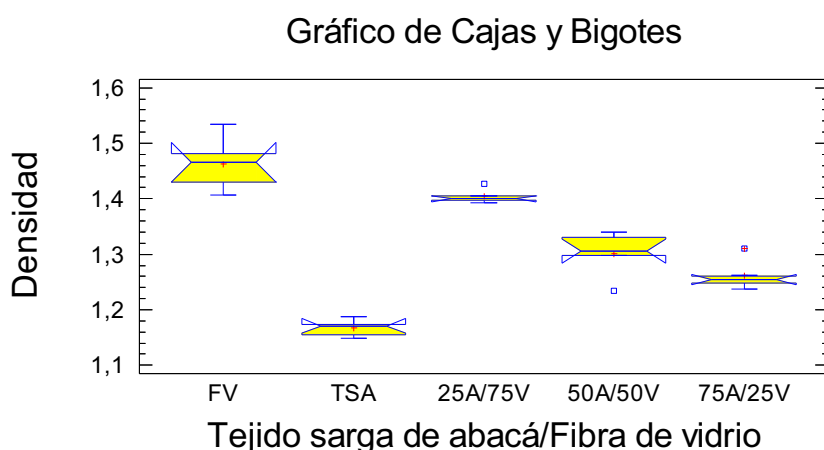


Figura 3.49. Densidad de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de las proporciones de las fibras dentro del 20 vol% de refuerzo híbrido.

Para todos los grupos analizados se observó que a medida que incrementaba la fracción volumétrica de fibra natural la densidad de los materiales compuestos

híbridos disminuyó, debido a que la fibra de abacá presenta menor densidad que la fibra de vidrio.

3.2.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Para el análisis de las propiedades mecánicas obtenidas de este ensayo se agruparon los resultados según la configuración de fibra de abacá. Los resultados obtenidos se compararon entre sí con los resultados de flexión de probetas de poliéster y fibra de vidrio.

Cabe señalar que las probetas de material compuesto híbrido y las de material compuesto reforzado con fibra de vidrio se rompieron durante el ensayo, en contraste con las de resina poliéster, las cuales tuvieron deflexiones más altas que la de los compuestos híbridos.

En la tabla 3.25 se resumen los valores de las propiedades mecánicas a flexión alcanzadas por las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.

Tabla 3.25. Valores promedio de las propiedades mecánicas a flexión alcanzadas por las formulaciones de cada configuración de fibra de abacá de los materiales compuestos híbridos.

Formulaciones del compuesto híbrido	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación a la ruptura	Módulo a la flexión [MPa]	Módulo de trabajo [MPa]
Fibra corta de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	84,02	0,0421	3420,20	2241,20
50A/50V	77,48	0,0345	3603,60	2537,80
75A/25V	81,69	0,0360	3588,80	2397,00
Fibra continua unidireccional de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	116,04	0,0281	5024,20	4327,00
50A/50V	127,74	0,0300	5544,80	4517,20
75A/25V	126,73	0,0402	5091,00	3344,60
Tejido plano de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	109,13	0,0363	4109,60	3210,00
50A/50V	79,06	0,0329	2918,20	2342,00
75A/25V	79,53	0,0312	3157,20	2410,60
Tejido sarga de abacá/Mat de fibra de vidrio				
25A/75V	80,03	0,0350	3036,60	2307,60
50A/50V	70,97	0,0347	2749,84	2012,60
75A/25V	68,64	0,0351	2667,12	1923,20

En la figura 3.50 se muestra las gráficas esfuerzo-deformación de las formulaciones según la configuración de la fibra de abacá. Se nota que dichas curvas esfuerzo-deformación presentan cierta linealidad hasta aproximadamente la mitad del valor de esfuerzo, a partir de este punto son no lineales.

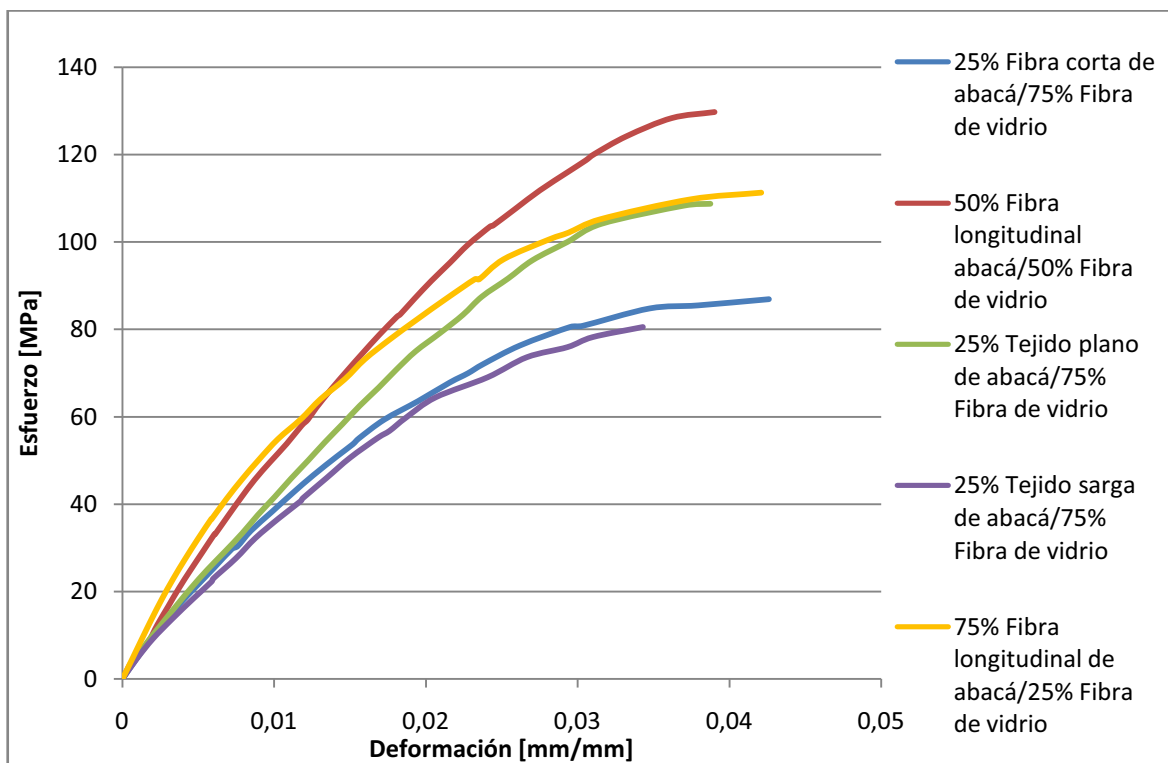
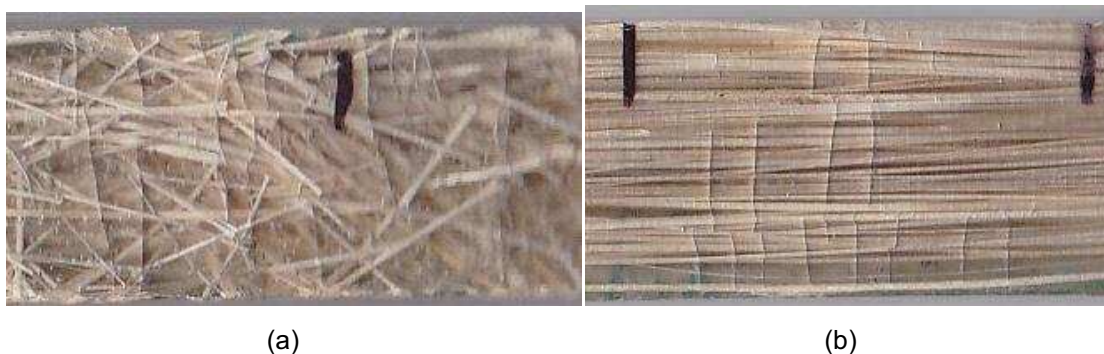


Figura 3.50. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio.

En la figura 3.51 se muestran acercamientos de las zonas de falla de las probetas de compuesto híbrido.



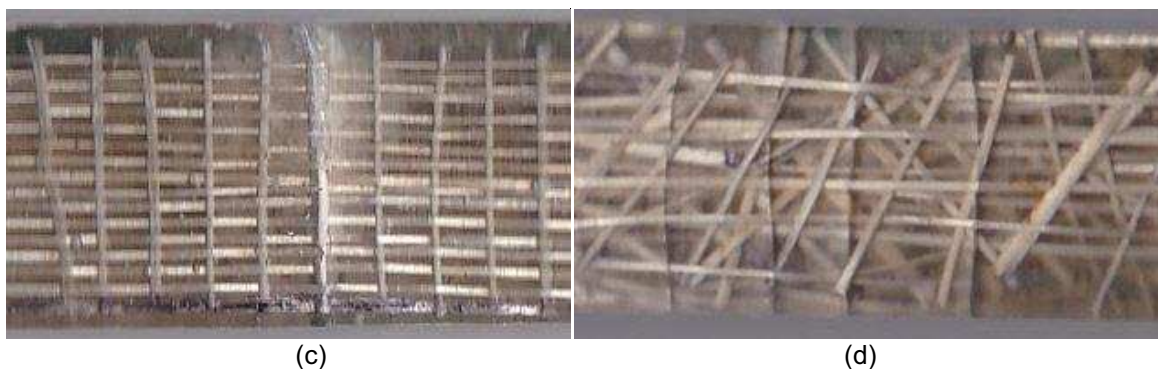


Figura 3.51. Acercamientos de las zonas de fractura observadas en probetas ensayadas a flexión de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con mat de fibra de vidrio y: (a) Fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente. (b) Fibra continua unidireccional de abacá. (c) Tejido plano de abacá. (d) Tejido sarga de abacá.

3.2.2.1. Esfuerzo máximo a la flexión

En la figura 3.52 se presenta el gráfico de medias para el esfuerzo máximo a la flexión de los materiales compuestos híbridos. El ANOVA indicó que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos los compuestos de fibra de vidrio y la resina poliéster, sin embargo entre formulaciones no hubo diferencia apreciable. La combinación del 25A/75V de vidrio arrojó los mejores resultados para esta propiedad, con un incremento del 41,26% respecto al poliéster puro y un decremento del 32,9% respecto al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

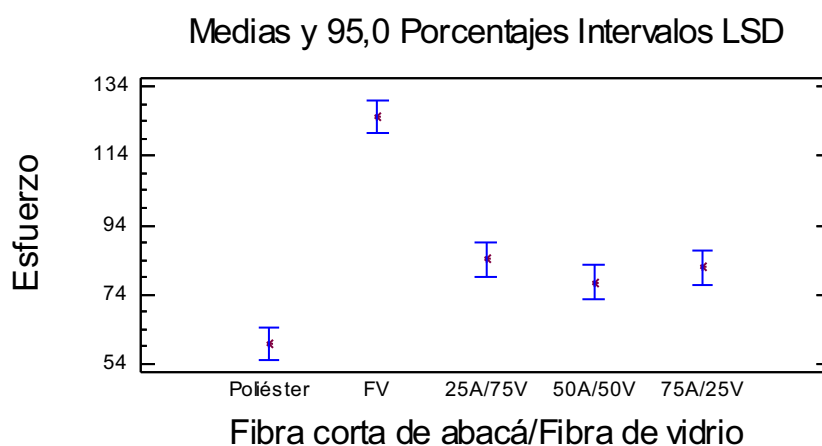


Figura 3.52. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.26 se resumen los valores de esfuerzo máximo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.26. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo máximo a la flexión [MPa]				
1	60,11	136,29	88,02	75,54	81,78
2	55,69	124,57	92,10	90,65	68,74
3	55,16	121,25	74,44	72,98	94,67
4	65,49	122,15	78,62	72,31	76,09
5	60,93	122,33	86,93	75,94	87,19
Promedio	59,48	125,32	84,02	77,49	81,69
Desviación estándar	4,23	6,25	7,25	7,52	9,97
CV	7,11	4,99	8,63	9,71	12,2

En la figura 3.53 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el esfuerzo máximo a la flexión de las formulaciones del material compuesto híbrido de matriz poliéster reforzado con fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis mostró que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las formulaciones de los compuestos híbridos y el material reforzado con mat de fibra de vidrio. La combinación del 50A/50V presentó los valores más sobresalientes con incrementos del 114,76% y 2% respecto al poliéster y al compuesto de mat de fibra de vidrio, respectivamente.

Gráfico de Cajas y Bigotes

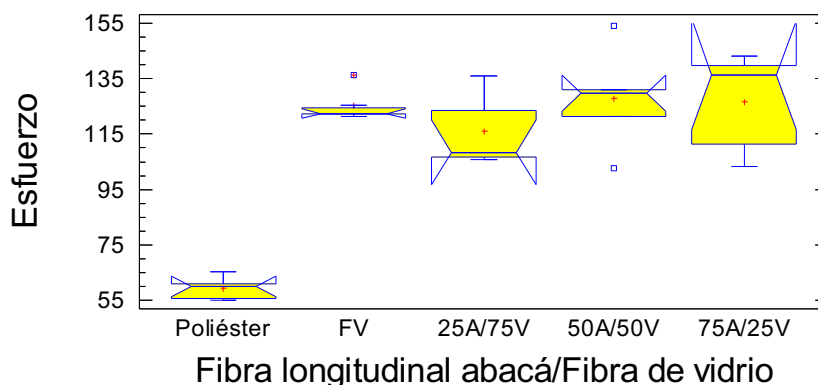


Figura 3.53. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.27 se resumen los valores de esfuerzo máximo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.27. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.

Probeta	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
	Esfuerzo máximo a la flexión [MPa]				
1	60,11	136,29	108,4	121,41	111,25
2	55,69	124,57	123,43	129,74	103,28
3	55,16	121,25	135,94	153,96	139,56
4	65,49	122,15	106,77	102,76	136,38
5	60,93	122,33	105,67	130,82	143,16
Promedio	59,48	125,32	116,04	127,74	126,73
Desviación estándar	4,23	6,25	13,25	18,47	18,14
CV	7,11	4,99	11,41	14,46	14,31

Cabe señalar que entre las formulaciones del 50A/50V y 75A/25V los valores de esfuerzo máximo fueron prácticamente similares, por haber aproximadamente un MPa de diferencia entre ellos.

En la figura 3.54 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el esfuerzo máximo a la flexión de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los híbridos el poliéster puro y el compuesto con mat de fibra de vidrio. La combinación del 25A/75V presentó mejores valores para esta propiedad. El incremento de la mejor formulación respecto al poliéster fue del 83,48% y el decremento fue de 13,2% respecto al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

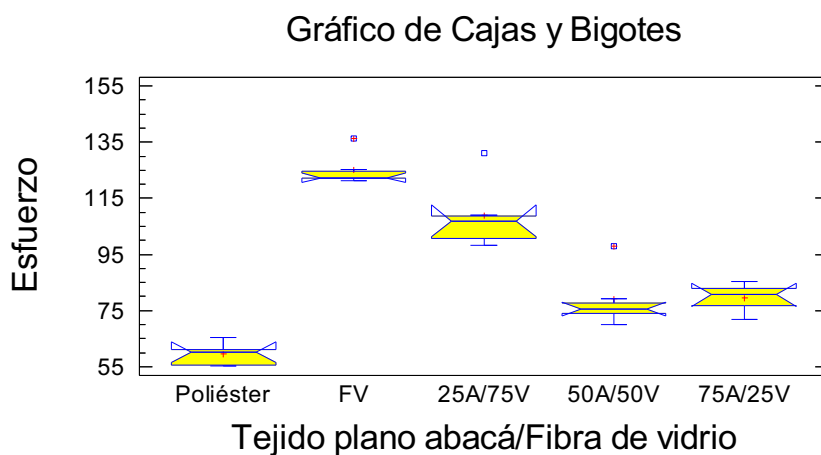


Figura 3.54. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.28 se resumen los valores de esfuerzo máximo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.28. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo máximo a la flexión [MPa]				
1	60,11	136,29	106,98	98,07	76,78
2	55,69	124,57	131,15	77,74	82,91
3	55,16	121,25	100,6	69,85	80,62
4	65,49	122,15	108,75	74,11	85,45
5	60,93	122,33	98,2	75,54	71,88
Promedio	59,48	125,32	109,13	79,06	79,53
Desviación estándar	4,23	6,25	13,05	11,00	5,33
CV	7,11	4,99	11,96	13,92	6,7

En la figura 3.55 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el esfuerzo máximo a la flexión de los materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa para el esfuerzo máximo entre los compuestos híbridos el poliéster puro y el material reforzado con mat de fibra de vidrio. Entre formulaciones no hubo diferencia apreciable excepto con la del 25A/75V, la misma que fue la que presentó el valor más relevante para esta propiedad, con un incremento del 34,55% respecto al poliéster y un decremento del 36,1% en relación con el compuesto de fibra de vidrio.

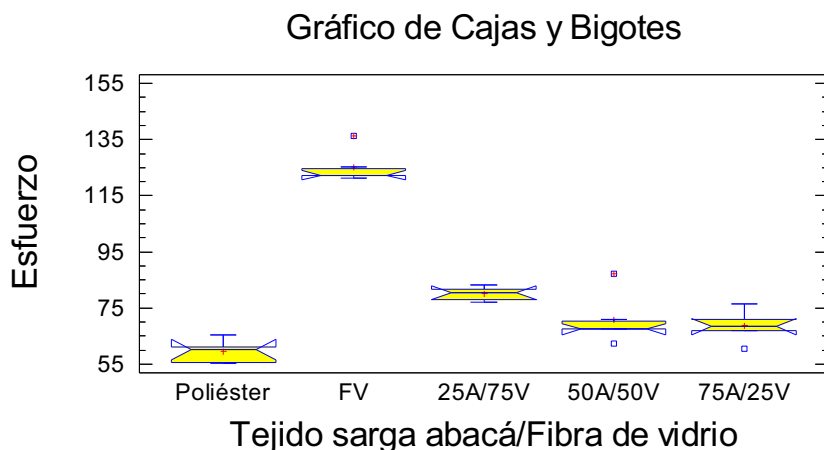


Figura 3.55. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.29 se resumen los valores de esfuerzo máximo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.29. Esfuerzo máximo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Esfuerzo máximo a la flexión [MPa]				
1	60,11	136,29	80,51	87,3	71,05
2	55,69	124,57	81,54	67,44	66,99
3	55,16	121,25	77,97	67,44	68,31
4	65,49	122,15	77,03	62,36	60,52
5	60,93	122,33	83,11	70,31	76,32
Promedio	59,48	125,32	80,03	70,97	68,64
Desviación estándar	4,23	6,25	2,51	9,56	5,77
CV	7,11	4,99	3,13	13,47	8,41

Los valores máximo y mínimo de la desviación estándar del esfuerzo máximo a la flexión obtenidos en la caracterización mecánica de los compuestos híbridos fueron de 18,47 y 2,51 MPa, respectivamente. Mientras que los del coeficiente de variación fueron 14,46 y 3,13. Se puede apreciar que los valores no son

demasiado altos, lo cual muestra que el procedimiento de fabricación estuvo controlado de forma adecuada por lo que los resultados son reproducibles.

3.2.2.2. Deformación máxima

En la figura 3.56 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para la deflexión máxima de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existió diferencia estadísticamente significativa únicamente entre el híbrido de 25A/75V, el poliéster puro, el compuesto de fibra de vidrio y las restantes formulaciones híbridas. El incremento del material con mayor deflexión fue del 28,35% y 31% en relación al poliéster y al material reforzado con mat de fibra de vidrio, respectivamente.

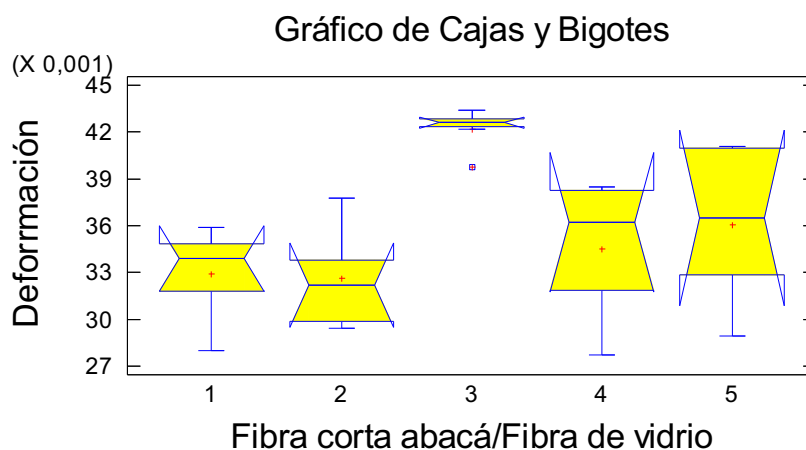


Figura 3.56. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la figura 3.57 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para la deformación máxima del compuesto híbrido de matriz poliéster reforzado con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis mostró que existe diferencia estadísticamente significativa para la deflexión máxima entre el híbrido 75A/25V el poliéster puro el compuesto de fibra de vidrio y las restantes formulaciones híbridas. El compuesto híbrido con el valor más relevante para esta propiedad presentó un incremento del 22,56% y 26,6% en

relación al poliéster y al material reforzado con mat de fibra de vidrio, respectivamente.

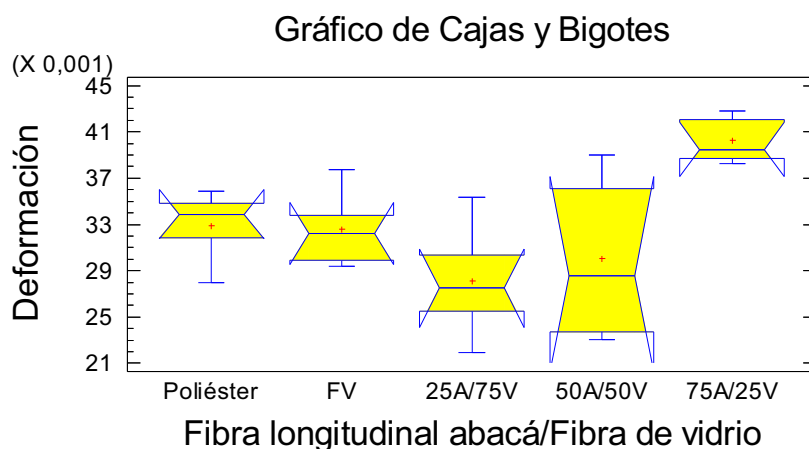


Figura 3.57. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la figura 3.58 se muestra la gráfica de medias para la deformación de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster, reforzados con tejido plano de abacá y fibra de vidrio. El ANOVA permitió conocer que existió diferencia estadísticamente significativa únicamente entre el híbrido de 25A/75V el del 75A/25V, el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. La formulación con mayor valor de esta propiedad presento un incremento del 10,67% y 13,4% en relación a la matriz y al material reforzado con mat de fibra de vidrio, respectivamente.

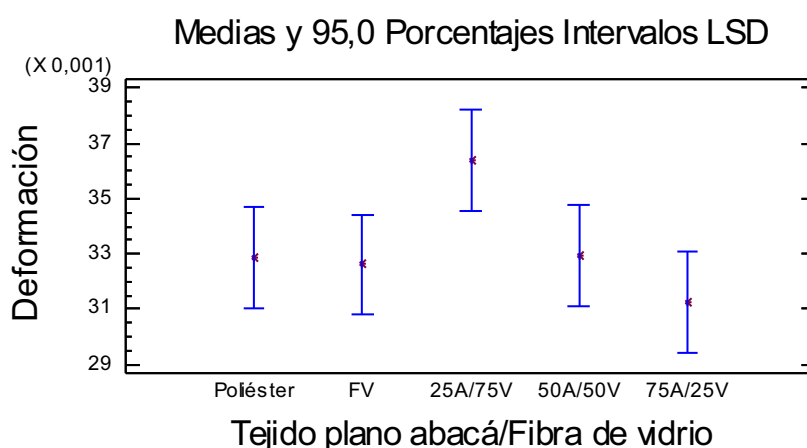


Figura 3.58. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la figura 3.59 se presenta el gráfico de medias para la deformación máxima de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio. El ANOVA indicó que no existe diferencia estadísticamente significativa para la deflexión máxima entre los compuestos híbridos. La formulación del 75A725V presentó el valor más relevante para esta propiedad con aproximadamente el 7% de incremento respecto al poliéster y al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

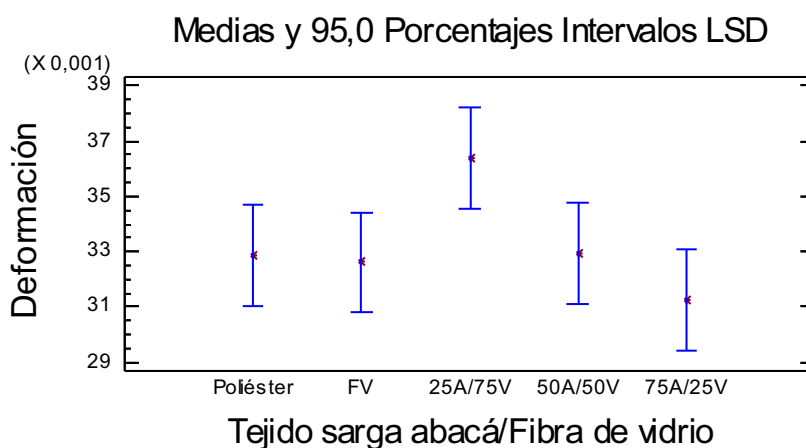


Figura 3.59. Deformación máxima de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

3.2.2.3. Módulo a la flexión

Se calcularon dos módulos a la flexión, considerando la forma de las curvas esfuerzo-deformación que se obtuvieron. El primer módulo se determinó como la pendiente de la región de la curva esfuerzo-deformación que incluyó los datos del 50% del esfuerzo máximo, cabe señalar que se despreciaron los datos del primer punto de dicha curva, de acuerdo con lo sugerido en la norma ASTM D 7264-07. El denominado módulo de trabajo corresponde a la región de la curva esfuerzo-deformación desde el 50% hasta el 75% del esfuerzo máximo, como se ilustra en la figura 3.60.

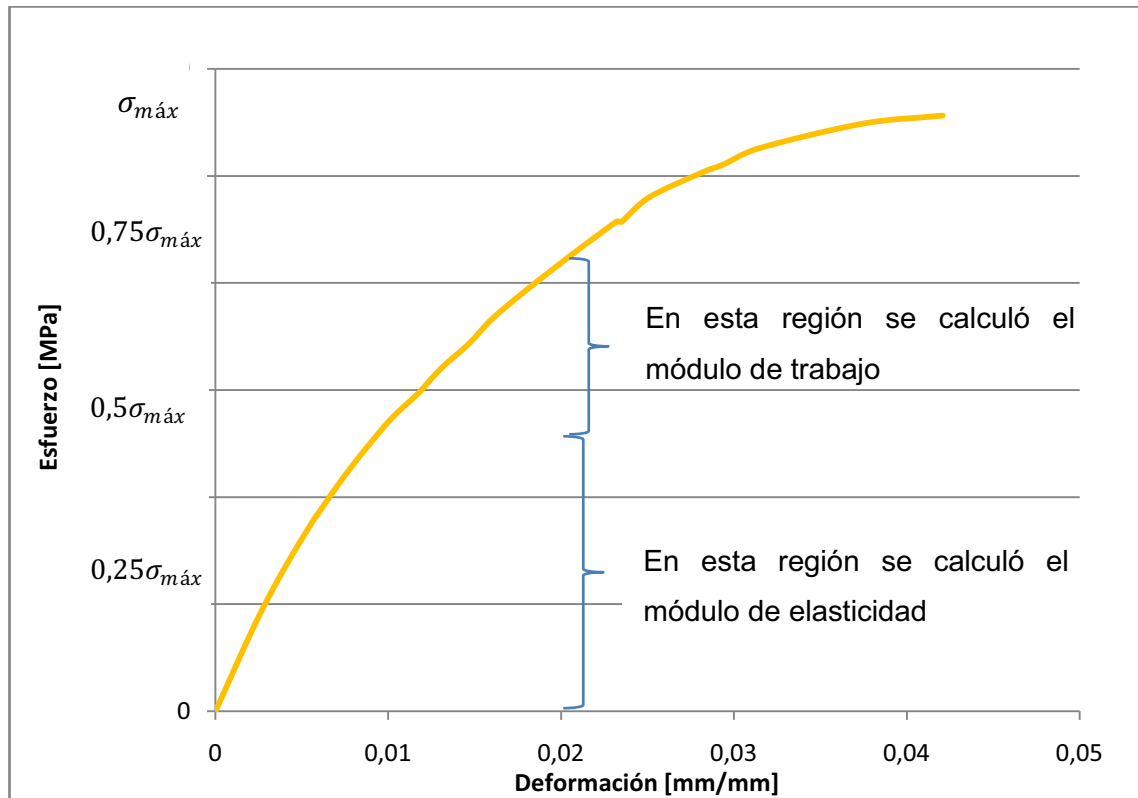


Figura 3.60. Regiones de la curva esfuerzo-deformación en las cuales se calcularon los módulos de a la flexión y de trabajo.

En la figura 3.61 se muestra la gráfica de cajas y bigotes para el módulo a la flexión de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente entre los híbridos el poliéster y el compuesto de fibra de vidrio. Sin embargo entre formulaciones no hubo diferencia considerable.

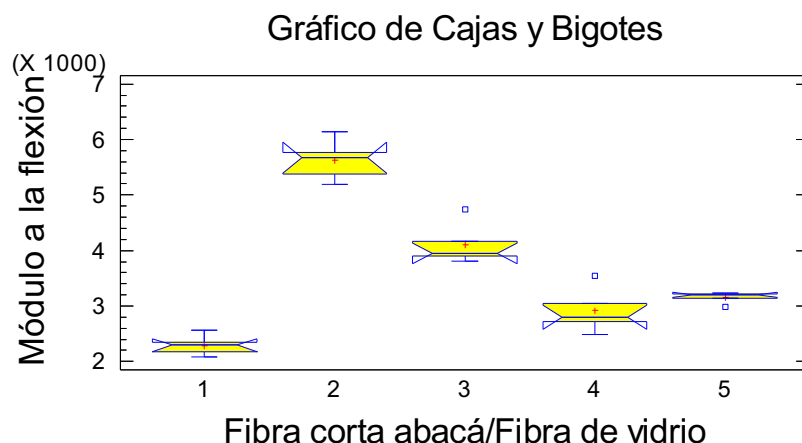


Figura 3.61. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido

La combinación de 50A/50V fue la que presentó el valor más representativo para esta propiedad, con un incremento del 57,22% respecto al poliéster y un decremento del 36% en relación al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

En la tabla 3.30 se resumen los valores del módulo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.30. Módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.

Probeta	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
	Módulo a la flexión [MPa]				
1	2295	6144	3671	3721	3717
2	2081	5774	3564	3927	2808
3	2171	5675	3090	3452	4334
4	2570	5186	3279	3455	3242
5	2343	5376	3497	3463	3843
Promedio	2292	5631	3420,2	3603,6	3588,8
Desviación estándar	186,45	370,33	233,69	214,01	584,44
CV	8,13	6,57	6,83	5,93	16,28

En la figura 3.62 se presenta el gráfico de cajas y bigotes para el módulo a la flexión de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis mostró que existe diferencia estadísticamente significativa para el módulo a la flexión entre los compuestos híbridos y el poliéster. Además entre las formulaciones híbridas y el material reforzado con mat de fibra de vidrio no hubo diferencia considerable.

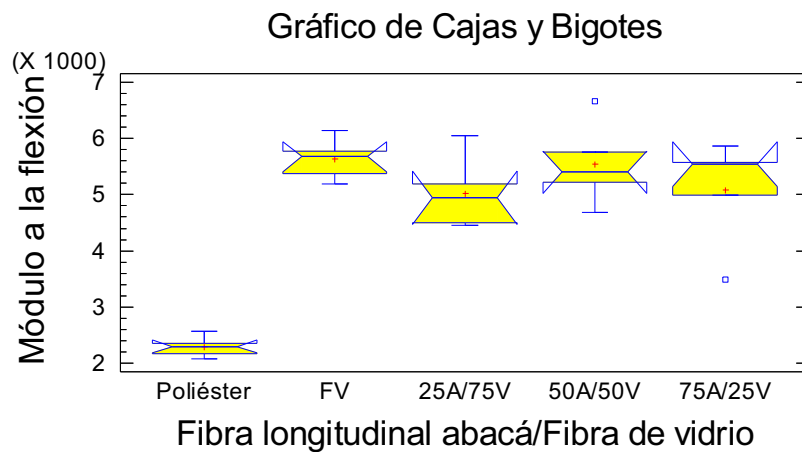


Figura 3.62. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.31 se resumen los valores del módulo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.31. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo a la flexión [MPa]				
1	2295	6144	4448	5752	4985
2	2081	5774	4939	4685	3492
3	2171	5675	6051	6670	5544
4	2570	5186	4497	5400	5571
5	2343	5376	5186	5217	5863
Promedio	2292	5631	5024,2	5544,8	5091
Desviación estándar	186,45	370,33	651,47	737,67	948,63
CV	8,13	6,57	12,96	13,3	18,63

La formulación de 50A/50V presentó el valor más elevado para esta propiedad, con un 141,91% respecto al poliéster y con un decremento del 1,5% en relación al compuesto de fibra de vidrio.

En la figura 3.63 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. La combinación del 25A/75V presentó el valor más alto para esta propiedad con un incremento del 68,41% respecto al poliéster y un decremento del 27% en relación al material reforzado con mat de fibra de vidrio. Cabe señalar que entre las formulaciones híbridas hubo diferencia considerable excepto con la del 25A/75V.

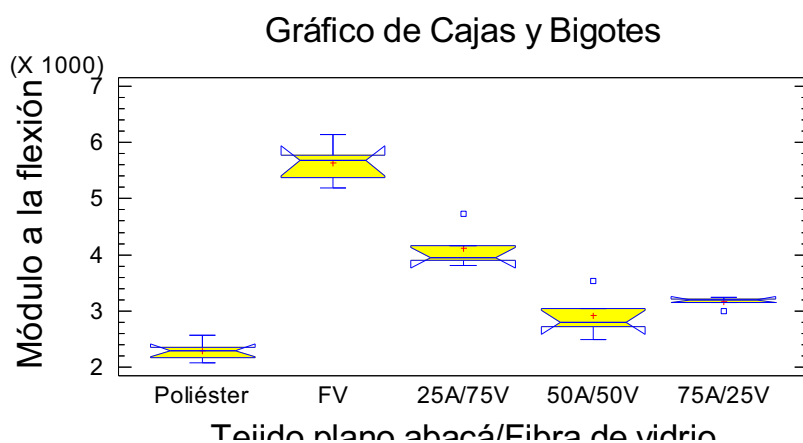


Figura 3.63. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.32 se resumen los valores del módulo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.32. Módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo a la flexión [MPa]				
1	2295	6144	4159	3537	3201
2	2081	5774	4734	2724	3141
3	2171	5675	3815	2494	3217
4	2570	5186	3894	2794	3235
5	2343	5376	3946	3042	2992
Promedio	2292	5631	4109,6	2918,2	3157,2
Desviación estándar	186,45	370,33	371,6	397,27	98,86
CV	8,13	6,57	9,04	13,61	3,13

En la figura 3.64 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. Respecto a las formulaciones híbridas hubo diferencia apreciable excepto entre la del 50A/50V y 75A/25V. La

combinación de 25A/75V presentó el mejor valor para esta propiedad con un incremento del 32,48% respecto al poliéster y un decremento del 46% en relación al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

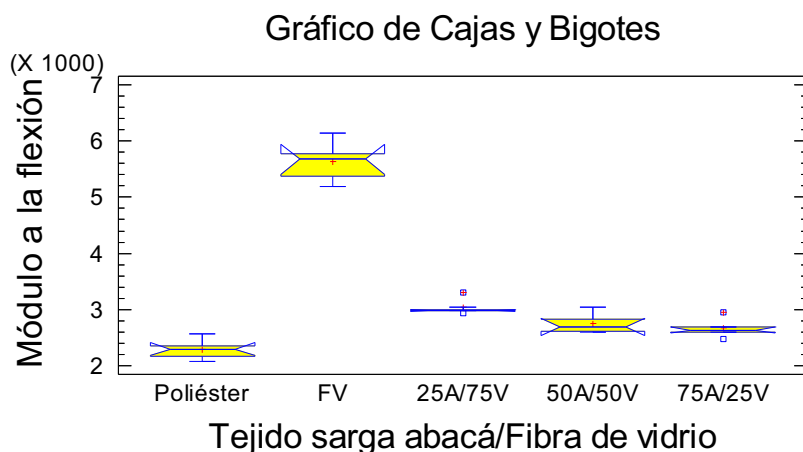


Figura 3.64. Módulo a la flexión de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.33 se resumen los valores del módulo a la flexión alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.33. Módulo a la flexión de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.

Probeta	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
	Módulo a la flexión [MPa]				
1	2295	6144	3301	3034,9	2601
2	2081	5774	2938	2821,8	2681,4
3	2171	5675	2980	2606,7	2629,9
4	2570	5186	2972	2688,4	2470,5
5	2343	5376	2992	2597,4	2952,8
Promedio	2292	5631	3036,6	2749,84	2667,12
Desviación estándar	186,45	370,33	149,16	182,98	177,64
CV	8,13	6,57	4,91	6,65	6,66

Los valores máximo y mínimo de la desviación estándar del módulo a la flexión obtenidos en la caracterización mecánica de los compuestos híbridos fueron de

948,63 y 98,86 MPa, respectivamente. Mientras que los del coeficiente de variación fueron 18,63 y 3,13. Se puede apreciar que los valores no son demasiado altos, lo cual muestra que el procedimiento de fabricación estuvo controlado de forma adecuada por lo que los resultados son reproducibles.

En la figura 3.65 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. Entre las formulaciones híbridas no exista diferencia estadística. La combinación de 50A/50V presentó el mejor valor para esta propiedad con un incremento del 39,6% respecto al poliéster y un decremento del 39% en relación al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

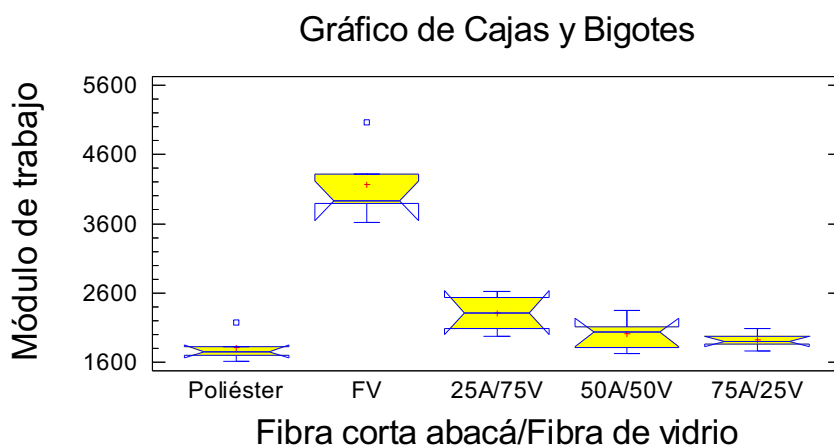


Figura 3.65. Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.34 se resumen los valores del módulo de trabajo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.34. Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra corta de abacá de 10 mm de longitud dispuesta aleatoriamente y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo a la flexión [MPa]				
1	1619	5055	2527	3425	2673
2	1699	3924	2507	2499	1674
3	1758	4310	1935	2402	2910
4	2177	3620	2122	2180	2112
5	1834	3897	2115	2183	2616
Promedio	1817,40	4161,20	2241,20	2537,8	2397
Desviación estándar	215,92	556,77	262,78	515,01	497,81
CV	11,88	13,38	11,72	20,29	20,76

En la figura 3.66 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra continua unidireccional de abacá y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. Entre las formulaciones híbridas no exista diferencia estadística. La combinación de 50A/50V presentó el mejor valor para esta propiedad con un incrementos del 148,5 y 8,5% respecto al poliéster al material reforzado con mat de fibra de vidrio, respectivamente.

Gráfico de Cajas y Bigotes

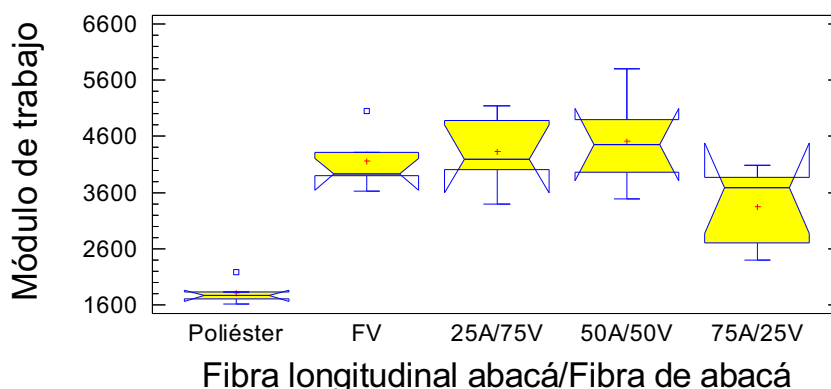


Figura 3.66. Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.35 se resumen los valores del módulo de trabajo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.35. Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra continua de abacá orientada longitudinalmente y mat de fibra de vidrio.

Probeta	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
	Módulo a la flexión [MPa]				
1	1619	5055	3400	4891	2701
2	1699	3924	4199	3483	2390
3	1758	4310	5137	5801	3679
4	2177	3620	4011	4454	4079
5	1834	3897	4888	3957	3874
Promedio	1817,40	4161,20	4327	4517,2	3344,6
Desviación estándar	215,92	556,77	697,56	890,96	751,15
CV	11,88	13,38	16,12	19,72	22,45

En la figura 3.67 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. Entre las formulaciones de 50A/50V

y 75A/25V no hay diferencia estadística. La combinación de 25A/75V presentó el mejor valor para esta propiedad con un incremento del 76,6% respecto al poliéster y un decremento del 22,8% en relación al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

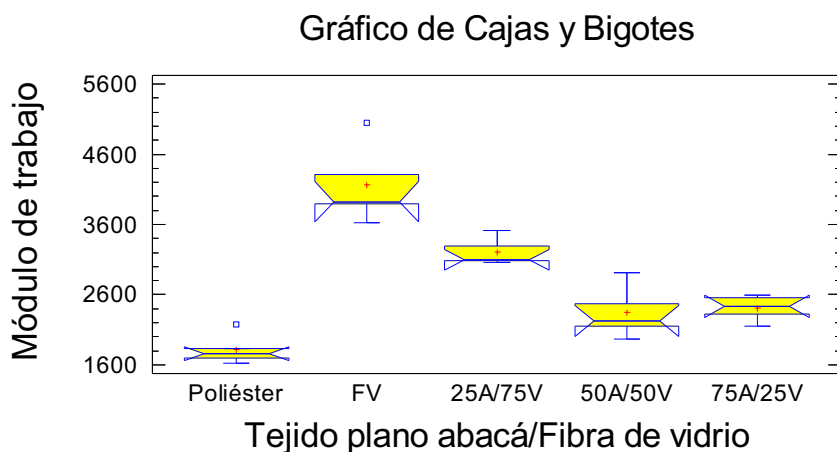


Figura 3.67. Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.36 se resumen los valores del módulo de trabajo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.36. Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido plano de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo a la flexión [MPa]				
1	1619	5055	3095	2913	2551
2	1699	3924	3515	2146	2318
3	1758	4310	3082	1960	2434
4	2177	3620	3063	2226	2595
5	1834	3897	3295	2465	2155
Promedio	1817,40	4161,20	3210	2342	2410,6
Desviación estándar	215,92	556,77	194,59	367,07	179,00
CV	11,88	13,38	6,06	15,67	7,42

En la figura 3.68 se muestra el gráfico de cajas y bigotes para el módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio. El análisis de Kruskal-Wallis permitió conocer que existe diferencia estadísticamente significativa entre los compuestos híbridos el compuesto de fibra de vidrio y el poliéster. Entre las formulaciones híbridas no hay diferencia estadística. La combinación de 25A/75V presentó el mejor valor para esta propiedad con un incremento del 26,9% respecto al poliéster y un decremento del 44,5% en relación al material reforzado con mat de fibra de vidrio.

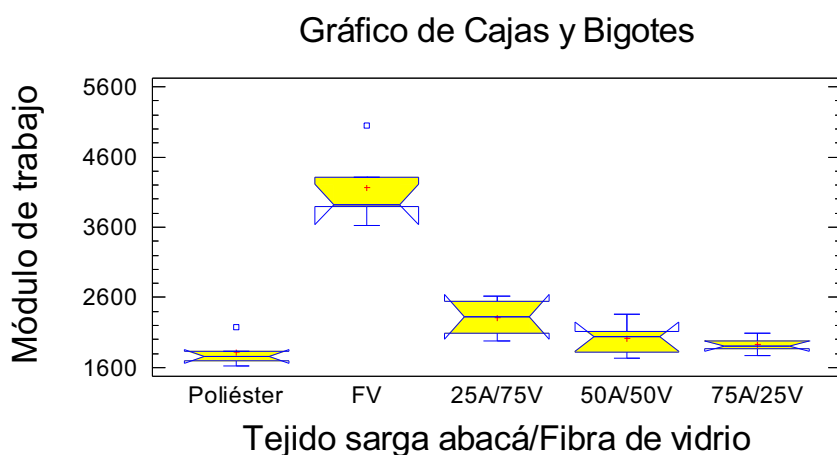


Figura 3.68. Módulo de trabajo de los compuestos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio, en función de la proporción de fibras en el refuerzo híbrido.

En la tabla 3.37 se resumen los valores del módulo de trabajo alcanzados por estos materiales.

Tabla 3.37. Módulo de trabajo de los compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con tejido sarga de abacá y mat de fibra de vidrio.

	Tipo de refuerzo del material compuesto				
	Poliéster	Mat de fibra de vidrio	25A/75V	50A/50V	75A/25V
Probeta	Módulo a la flexión [MPa]				
1	1619	5055	2543	2356	1771
2	1699	3924	2621	2119	1871
3	1758	4310	2083	1733	1904
4	2177	3620	1973	2036	1980
5	1834	3897	2318	1819	2090
Promedio	1817,40	4161,20	2307,60	2012,60	1923,20
Desviación estándar	215,92	556,77	281,13	247,71	119,69
CV	11,88	13,38	12,18	12,30	6,22

Los valores máximo y mínimo de la desviación estándar del módulo de trabajo obtenidos en la caracterización mecánica de los compuestos híbridos fueron de 890,96 y 194,59 MPa, respectivamente. Mientras que los del coeficiente de variación fueron 22,45 y 6,06. Se puede apreciar que los valores no son demasiado altos, lo cual muestra que el procedimiento de fabricación estuvo controlado de forma adecuada por lo que los resultados son reproducibles.

Los resultados mostraron que el compuesto híbrido del 50FLA/50FV presentó las mejores propiedades mecánicas a flexión. Para esta misma configuración de fibra, el híbrido del 75A/25V tuvo valores de esfuerzo y módulo a la flexión muy semejantes a los del primer material mencionado. Por otra parte en los ensayos mecánicos a tracción, el híbrido del 75FLA/25FV mostró valores muy superiores al resto de formulaciones. En las figuras 3.69 y 3.70 se muestran las gráficas de barras con desviación estándar para el esfuerzo, el módulo a la flexión y de trabajo, respectivamente. Por esta razón se eligió este último material como la mejor formulación, dado que tuvo la mejor combinación de propiedades.

En la figura se nota el efecto del refuerzo en la matriz incrementando el esfuerzo a la flexión del poliéster. Las formulaciones híbridas del 50A/75V y 75A/25V de fibra continua unidireccional de abacá igualan el esfuerzo máximo a la flexión del

compuesto de mat de fibra de vidrio. Además, estos son más livianos al estar constituidos mayoritariamente por fibra natural. Sobresale también el compuesto de 25A/75V de tejido plano, en vista de que estadísticamente posee el mismo esfuerzo máximo que las mejores formulaciones ya mencionadas.

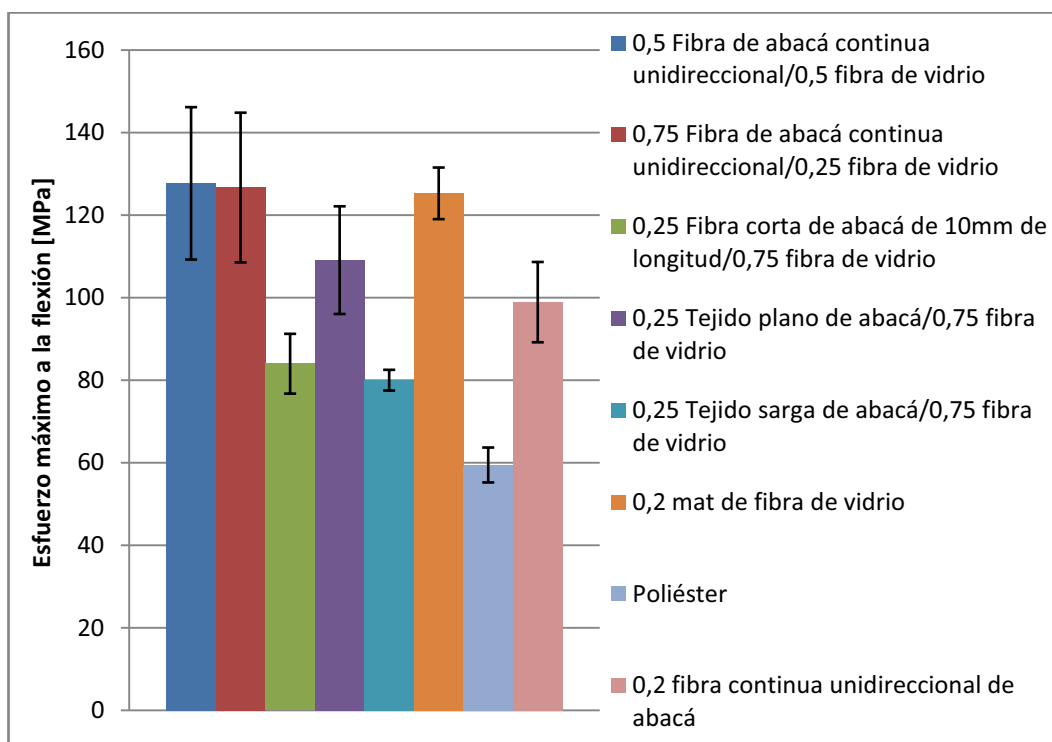
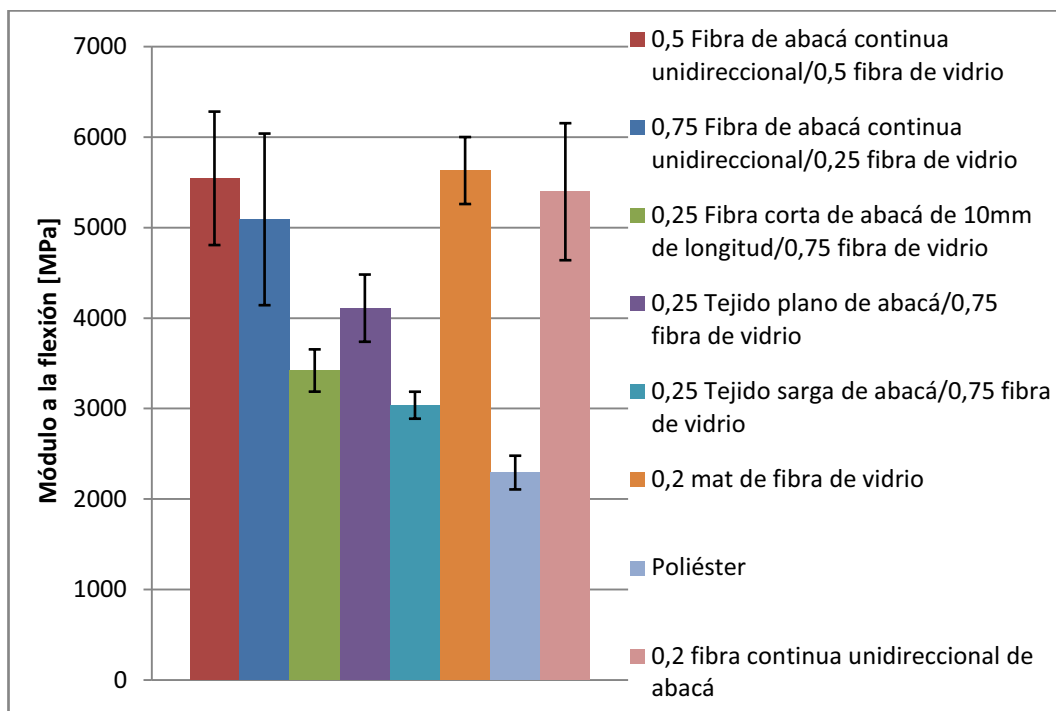
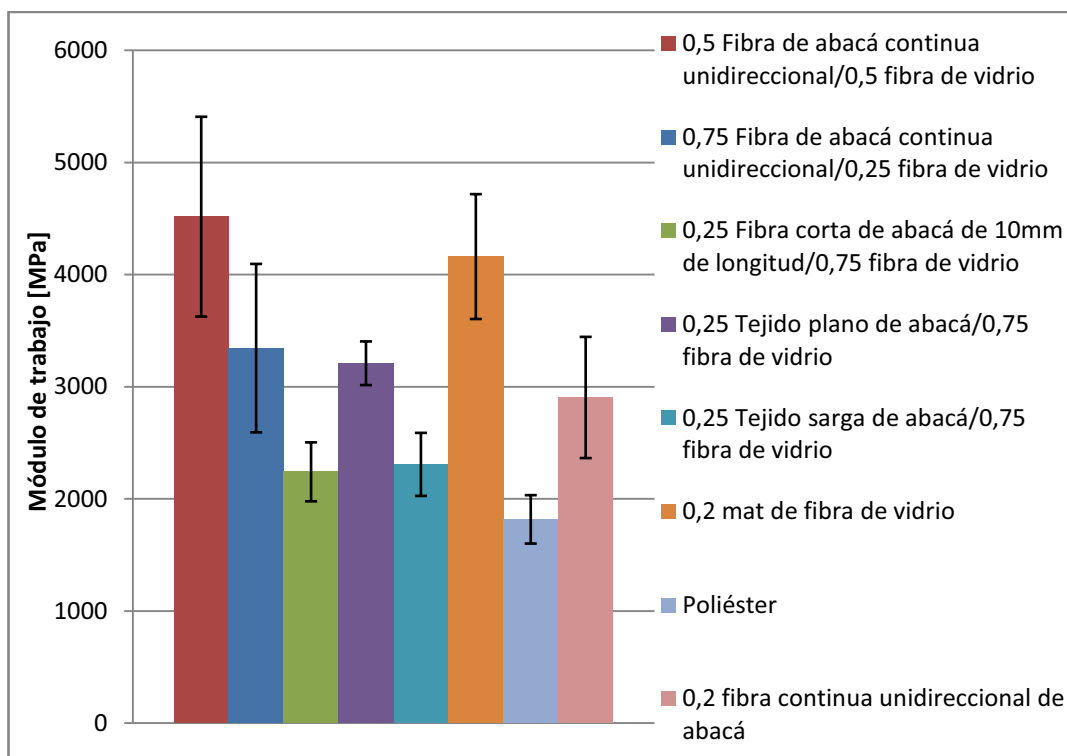


Figura 3.69. Esfuerzo máximo a la flexión de las mejores formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.



(a)



(b)

Figura 3.70. (a) Módulo a la flexión. (b) Modulo de trabajo de las mejores formulaciones de cada configuración de fibra de abacá.

En cuanto al módulo a la flexión los compuestos del 0,2 vol% de fibra continua unidireccional, 0,2 vol% mat de fibra de vidrio, 50A50V y 75A25V fibra continua unidireccional de abacá presentan valores estadísticamente similares para esta propiedad. Al igual que en el esfuerzo máximo, el tejido plano sobresale del resto de las formulaciones. Además, esta configuración presentaría las mismas propiedades en estados de carga biaxiales a diferencia de los materiales reforzados con de fibra unidireccional de abacá y mat de fibra de vidrio que son anisotrópicos.

Para el módulo de trabajo resaltan el compuesto reforzado con 0,2 de mat de fibra de vidrio y el híbrido 750A/50V de fibra continua unidireccional de abacá y mat de fibra de vidrio. Para esta propiedad la combinación 25A/75V de tejido plano y mat de fibra de vidrio, 0,2 fibra continua unidireccional de abacá y el 75A/25V FLA/FV muestran valores similares para esta propiedad.

3.2.3. ENSAYO DE IMPACTO

Se ensayaron dos tipos de material compuesto, el primero fue de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio con el 20% de fracción volumétrica, el segundo fue el híbrido que presentó la mejor combinación de propiedades mecánicas a tracción y flexión, es decir 75FLA/25FV con una fracción volumétrica total del 20%. Además, se evaluó el comportamiento a impacto de la matriz de los compuestos mencionados. Los resultados obtenidos de este ensayo se presentan en el anexo 4. En la tabla 3.38 se resumen los resultados de este ensayo.

Tabla 3.38. Resumen de los resultados de los materiales ensayados a impacto.

Material	Fracción volumétrica	Resistencia al impacto [J]
75FLA/25FV	0,2	0,492
Mat de fibra de vidrio	0,2	0,508
Poliéster	-	0,070

El valor de resistencia al impacto del compuesto de fibra de vidrio mostró una diferencia del 1,64% respecto al compuesto híbrido, dicha diferencia no fue significativa por estar en el orden de las centésimas. La resistencia al impacto del

compuesto híbrido 75FLA/25FV mejoró ostensiblemente en relación a la matriz, dicha diferencia radicó en un 614%.

En la figura 3.71 se muestra las probetas de resina y de los compuestos después de que se realizó el ensayo. En las probetas ensayadas se nota que la matriz por si sola es muy frágil, rompiéndose en varios pedazos. En contraste con los compuestos de fibra de vidrio y la mejor formulación híbrida, estos sufrieron fisuras y rupturas pequeñas en la matriz demostrando así la mejora en la resistencia al impacto.

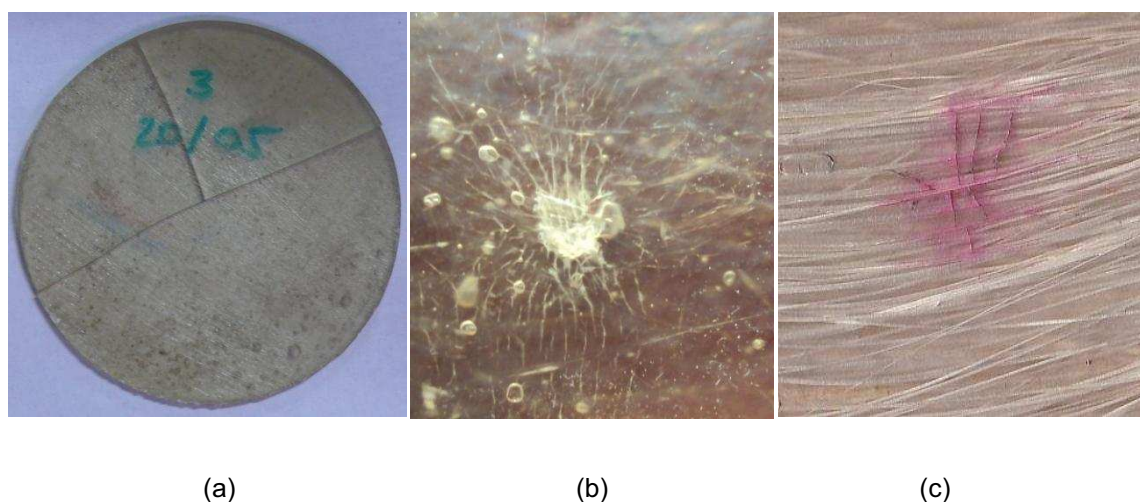


Figura 3.71. Fotografías de las probetas después del ensayo. (a) Resina poliéster. (b) Material compuesto reforzado con mat de fibra de vidrio. (c) Compuesto híbrido reforzado con fibra longitudinal de abacá y mat de fibra de vidrio.

Con la finalidad de analizar el comportamiento de los materiales compuestos se calculó el esfuerzo máximo a la tracción y el módulo de elasticidad específicos, dividiendo dichas propiedades para la densidad de los compuestos. En la figura 3.72 se muestra el gráfico del esfuerzo máximo específico vs módulo de elasticidad específico para los materiales híbridos obtenidos, 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.

Al igual que en análisis anteriores la fibra con el 75A/25V 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.

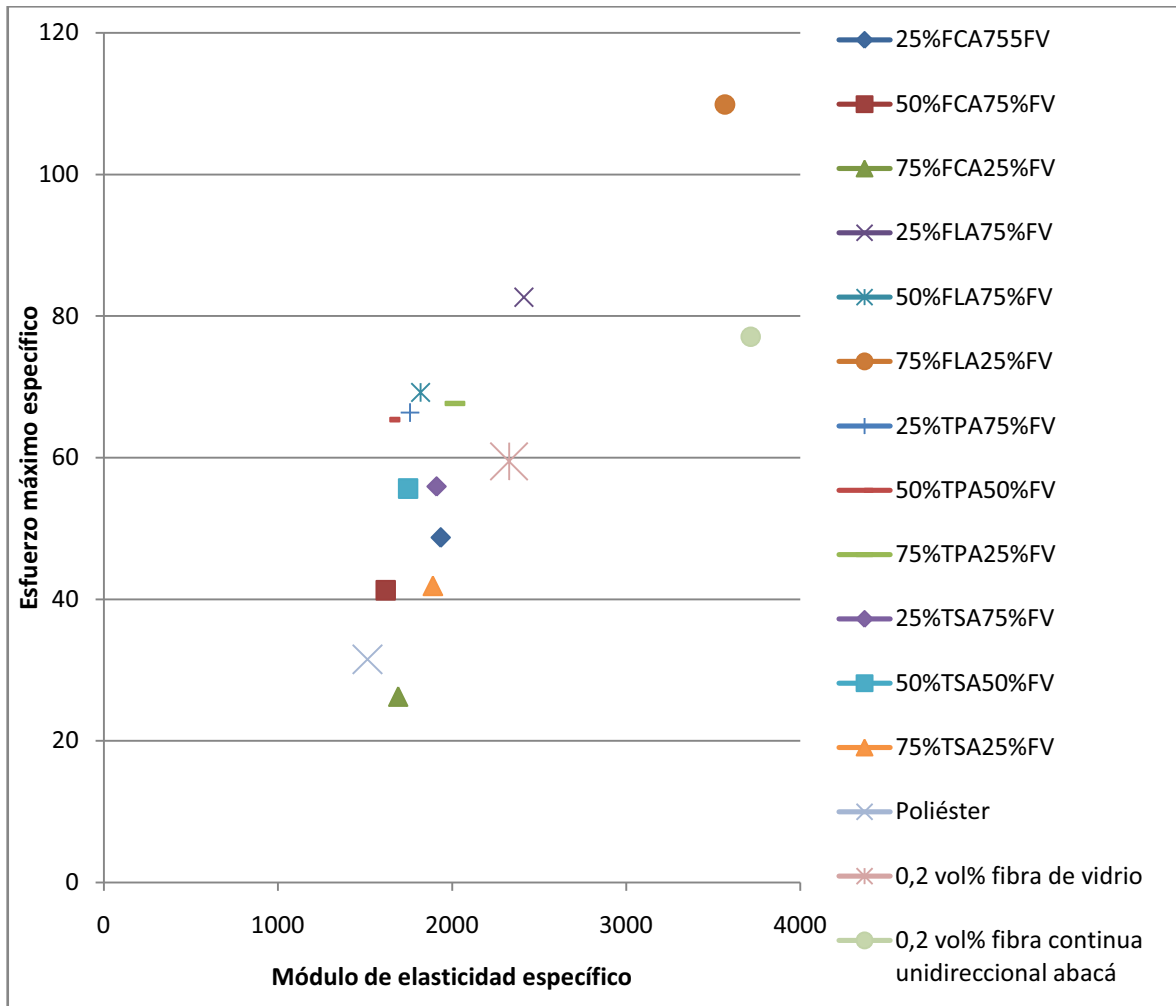


Figura 3.72. Esfuerzo máximo a la tracción específico vs. módulo de elasticidad específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos.

Se analiza también el comportamiento de los materiales compuestos a flexión. Para ello se calculó el esfuerzo máximo a la flexión y el módulo a la flexión específicos, dividiendo dichas propiedades para la densidad de los compuestos. En la figura 3.73 se muestra el gráfico del esfuerzo máximo específico vs. módulo a la flexión específico para los materiales híbridos obtenidos, 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.

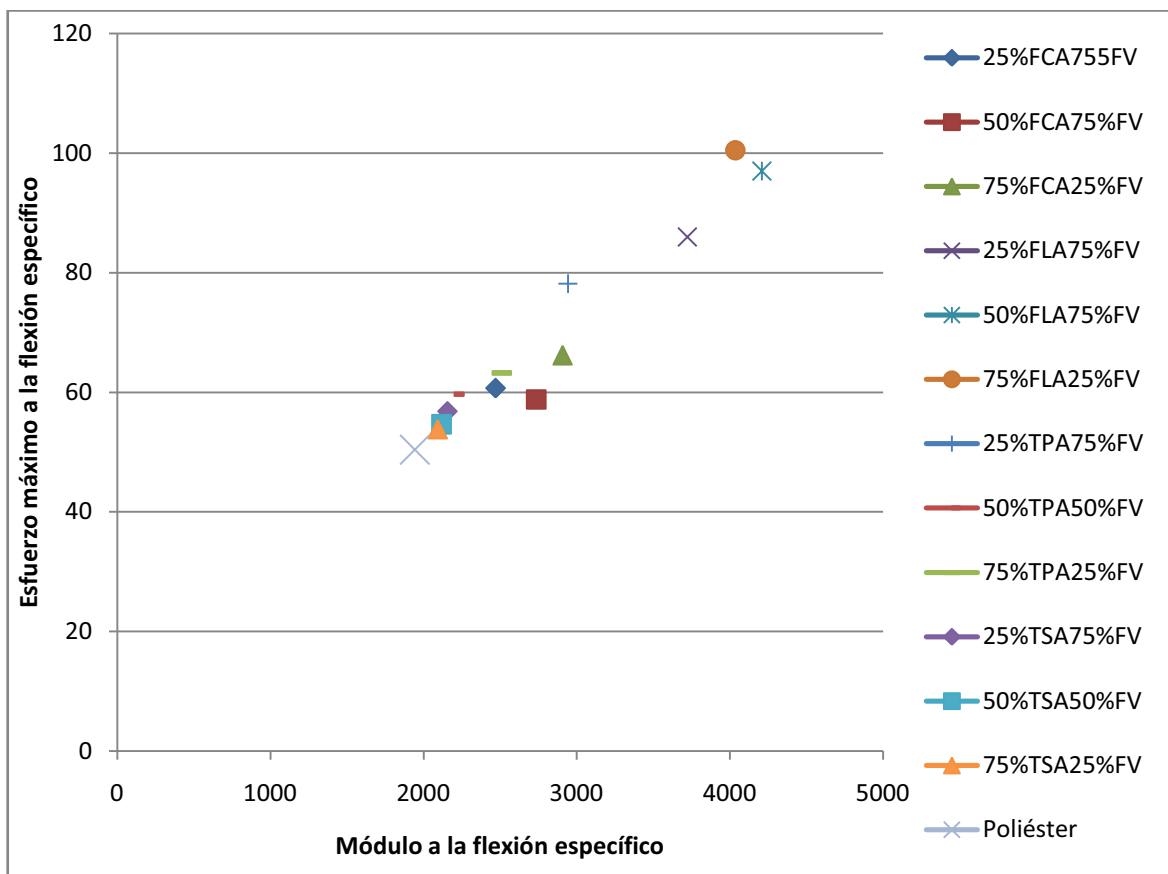


Figura 3.73. Esfuerzo máximo a la flexión específico vs. módulo a la flexión específico de los materiales compuestos híbridos obtenidos.

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 por la menor densidad de la fibra natural respecto a la de la fibra sintética.

En las tablas 3.39, 3.40 y 3.41 se comparan los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación con los de anteriores estudios realizados, citados en el acápite 1.4.

Tabla 3.39. Comparación de resultados de las propiedades mecánicas de estudios realizados con el compuesto híbrido de matriz poliéster, reforzado con fibra de abacá y vidrio. [Azevedo, 2004; Carvalho, 2006; Barros, 2006; Junior, 2009]

Material Compuesto	Fracción	Resistencia a la rotura [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Módulo de flexión [GPa]	Resistencia al impacto [J]
Poliéster	-	37.1±30%	1.7±10%	59,4±7%	2.29±8%	0.07
Yute-Vidrio/Poliéster	-	68.57±25.01%	1.24±10.9%	-	-	-
Sisal-Vidrio/Poliéster	20% en peso	123.8±13.7%	3.83±0.3%	-	-	-
Curuá-Vidrio/Poliéster	-	92.2±6.7%	2.34±4.4%	144.49±4.2%	7.58±3%	-
Pijuayo-Vidrio/Poliéster	10% en peso	19	5.5	-	-	2
75FLA/25FV/ Poliéster	20% en volumen	137,7±5,18%	4,47±5,83%	126,7±14,3%	5,09±18,6%	0,492

El híbrido de abacá-vidrio presenta propiedades mecánicas a tracción muy elevadas respecto al de yute-vidrio, en cuanto al del sisal-vidrio la diferencia disminuyó ostensiblemente. En relación al compuesto curuá-vidrio las propiedades son superiores a tracción, mientras que a flexión los valores de este compuesto superan las del abacá-vidrio principalmente en el módulo a la flexión. El híbrido pijuayo-vidrio la resistencia a la ruptura es muy inferior, sin embargo el módulo de elasticidad fue superior al material desarrollado. En cuanto a la resistencia al impacto la diferencia radicó en un 300%, lo que sugiere que la combinación pijuayo-vidrio resultó un material frágil.

Tabla 3.40. Comparación de las propiedades mecánicas de materiales compuestos híbridos de distintas matrices reforzadas con varios tipos de fibras con el compuesto híbrido de matriz poliéster reforzado con fibra de abacá y vidrio. [Chand, 2008]

Matriz	Fracción volumétrica(V) o en peso (P)			Propiedades mecánicas						
	Sisal	Vidrio	Yute	RT [MPa]	ME [GPa]	ER [%]	RC [MPa]	RF [MPa]	MF [GPa]	
Epoxi	0,30 V	-		12,37	133,3	8,8	-	-	-	
	0,27 V	0,02 V		15,97	160,8	7,64	-	-	-	
	0,24 V	0,04 V		16,68	171,4	7,56	-	-	-	
	0,21 V	0,06 V		16,92	187,5	7,16	-	-	-	
	0,18 V	0,08 V		17,6	192,3	6,9	-	-	-	
	0,15 V	0,10 V		17,76	196,6	6,6	-	-	-	
	0,09 V	0,14 V		19,98	200	5,88	-	-	-	
	0,06 V	0,16 V		20,98	210	5,62	-	-	-	
	-	0,20 V		22,94	220	4,81	-	-	-	
		-	32,9 P	104	15	0,69	95	150	14,6	
		40 P	18 P	157	25,4	0,62	158	445	20,8	
		30 P	20 P	143	22,7	0,63	137	418	20,7	
		40 P	14,4 P	238	30,6	0,78	204	624	28,3	
		68,2 P	-	429	41,3	1,04	320	938	37,4	
Poliéster		-	21,8 P	84	12,2	0,69	123	125	8,1	
			38,5 P	10,1 P	200	18,2	1,10	-	229	17,6
			69,1 P	-	391	38,8	1,01	-	816	32,8
		Abacá FLA	FV							
		0,15V	0,05V	-	137,7	4,47	2,96	-	126,7	5,09
	15,24P	10,16P	-	137,7	4,47	2,96	-	126,7	5,09	

Los compuestos de matriz epoxi reforzados con fibras de sisal y vidrio presentan resistencias a la tracción muy bajas en comparación con el compuesto de poliéster con refuerzo de abacá-vidrio, lo que contrasta con los altos módulos de elasticidad de dicho compuesto. Esta propiedad se incrementa conforme la cantidad de fibra de vidrio aumenta.

En cuanto a los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras de yute y vidrio las resistencias tanto a tracción y flexión son superiores a las obtenidas con el compuesto abacá-vidrio/poliéster, puesto que las fracciones en peso de este material fueron muy altas en comparación a la fracción en peso del 25,4% del híbrido abacá-poliéster.

Tabla 3.41. Comparación de propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y fibras naturales con el compuesto reforzado con fibra de abacá y vidrio [Maldonado y Paredes, 2010; Chand, 2005]

Material compuesto	Fracción	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Densidad [g/cm ³]
Fibra de vidrio corta 10 mm longitud/Poliéster	0,4 en volumen	103-206	55-138	1,4-2,3
Mats de fibra de vidrio/Poliéster	0,3 en peso	100	7,7	1,4
Tejido de fibra de vidrio/Poliéster	0,4 en volumen	206-344	103-310	1,5-2,1
Fibra de abacá continua unidireccional/Poliéster	0,2 en volumen	82-94	4,08-4,32	1,11-1,17
Fibra de yute/Poliéster	0,21 en peso	84	12,2	-
Fibra longitudinal abacá-mat de fibra de vidrio/Poliéster	0,2 en volumen	137,7	4,47	1,25
Fibra longitudinal abacá-mat de fibra de vidrio/Poliéster	0,254 en peso	137,7	4,47	1,25

Sobresale la densidad del compuesto abacá-vidrio, puesto que al estar constituida mayoritariamente por fibra natural la densidad es baja respecto a los compuestos reforzados con fibra de vidrio. En cuanto a las propiedades mecánicas de los compuestos de fibra de vidrio son superiores a los de abacá-vidrio, debido a que la cantidad de fibra sintética que se puede adicionar es muy alta en comparación con el híbrido abacá-vidrio.

Con este tipo de material se podría construir satisfactoriamente tableros o productos que básicamente tengan forma de placas o membranas, en vista de la facilidad de procesamiento de este material. Si se tratara de construir elementos de dimensiones considerables se podría analizar la posibilidad de fabricar dichos elementos con otros procesos de fabricación.

3.2.4. SELECCIÓN DEL PROTOTIPO A CONSTRUIRSE

Con la formulación que presentó la mejor combinación de propiedades mecánicas se debía construir un prototipo de un producto existente en el mercado, del cual se espera que iguale o supere las prestaciones del modelo original. Por lo cual se analizó las características del híbrido obtenido. Sobresalen las propiedades mecánicas a tracción y flexión, baja densidad al estar constituido mayoritariamente por fibra natural. Sin embargo, la configuración de la fibra lo

hace anisotrópico, por lo que para su correcto funcionamiento debe estar sometido a cargas uniaxiales o de flexión en un plano alineado con la dirección de las fibras unidireccionales.

Se analizó la posibilidad de construir un tablero para un escritorio, un perfil tipo C y el tablero de una patineta. Para lo cual se planteó criterios de selección como: la facilidad de moldeo, los procesos de fabricación después del moldeo (post maquinado) y la funcionalidad del prototipo.

La facilidad de moldeo implica la comodidad de estratificar las fibras y de depositar la resina sobre el molde, lo que se relaciona con la geometría del producto a fabricar. La funcionalidad se entiende como el nivel de aprovechamiento del elemento a construir al unirse a un conjunto. En cuanto al trabajo de post-maquinado se entiende por el proceso de conformabilidad después de retirar el prototipo del molde para obtener el producto final. En este paso estarían incluidos procesos de corte, taladrado, etc.

Para la selección del prototipo se utilizó la valoración según los criterios descritos, los mismos que se muestran en la tabla 3.42.

Tabla 3.42. Valoración de los criterios de selección.

Criterio	facilidad de moldeo	post maquinado	funcionalidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Facilidad de moldeo		1	1	3	0,5
Post-maquinado	0		1	2	0,33
Funcionalidad	0	0		1	0,16
			Suma	6	1

Facilidad de moldeo>Post maquinado>Funcionalidad

En la tabla 3.43 se presenta la evaluación del peso específico de la facilidad de moldeo. Cabe señalar que, por facilidad, la denominación de los prototipos fue reemplazada por la siguiente nomenclatura:

Prototipo A: Tablero

Prototipo B: Perfil tipo C

Prototipo C: Patineta

Tabla 3.43. Evaluación del peso específico de la facilidad de moldeo.

Facilidad de moldeo	Prototipo A	Prototipo B	Prototipo C	$\Sigma+1$	Ponderación
Prototipo A		1	0,5	2,5	0,416
Prototipo B	0		0	1	0,166
Prototipo C	0,5	1		2,5	0,416
			Suma	6	1

Prototipo A=Prototipo C>Prototipo B

En la tabla 3.44 se muestra la evaluación del peso específico del trabajo de post-maquinado.

Tabla 3.44. Evaluación del peso específico del trabajo de post maquinado.

Post maquinado	Prototipo A	Prototipo B	Prototipo C	$\Sigma+1$	Ponderación
Prototipo A		0,5	1	2,5	0,416
Prototipo B	0		0	1	0,166
Prototipo C	0,5	1		2,5	0,416
			Suma	6	1

Prototipo A=Prototipo C>Prototipo B

En la tabla 3.45 se presenta la evaluación del peso específico de la funcionalidad.

Tabla 3.45. Evaluación del peso específico de la funcionalidad.

Funcionalidad	Prototipo C	Prototipo A	Prototipo B	$\Sigma+1$	Ponderación
Prototipo C		1	1	3	0,5
Prototipo A	0		0,5	1,5	0,25
Prototipo B	0	0		1	0,16
			Suma	6	1

Prototipo C>Prototipo A>Prototipo B

Finalmente, en la tabla 3.46 se muestra el resumen de la conclusión de este análisis. Dando como resultado como la mejor opción la construcción de la patineta.

Tabla 3.46. Evaluación del peso específico de la funcionalidad.

Conclusión	Facilidad de moldeo	Post maquinado	Funcionalidad	Σ	Prioridad
Prototipo A	0,2	0,13	0,04	0,38	3
Prototipo B	0,08	0,05	0,02	0,16	2
Prototipo C	0,2	0,13	0,08	0,43	1

En base al trabajo realizado en la construcción de prototipos del proyecto “Obtención de Materiales Compuestos de Matriz Poliéster Reforzados con Fibra de Abacá Mediante Estratificación Manual”, en el cual se buscó reemplazar tableros de un material tradicional como la madera, se conoció la facilidad de moldeo de los tableros de material compuesto para que adopten formas curvas cuando el poliéster aún no se solidifica.

En este punto se analizó la posibilidad de fabricar el tablero de una patineta por la facilidad de conformación y maquinabilidad conocida del proyecto mencionado. Cabe señalar que las industrias dedicadas a la elaboración de patinetas han empezado a incluir fibras sintéticas y matrices termoestables en sus productos, con la finalidad de superar las propiedades mecánicas de los tableros constituidos de madera. Las patinetas están constituidas por el tablero, las ruedas y los pernos de anclaje entre los elementos mencionados. [Internet 5]

En vista de la facilidad de construcción, al seguir un proceso bastante práctico, se decidió fabricar el tablero de una patineta, dicho proceso se describe en el acápite 2.3.2 posteriormente se realizaron procesos de corte y taladrado para obtener la forma final del prototipo. Para ello se hicieron pruebas preliminares donde el mayor problema que se presentó, fue que por una limitación tecnológica, al no contar con una prensa hidráulica lo suficientemente grande en la que quepa el molde utilizado para el prototipo, no fue posible adicionar el 20% de fracción volumétrica de refuerzo. Se determinó la mayor cantidad de refuerzo a añadir, el cual fue del 15%.

Con la fracción volumétrica del 15% a usarse en la construcción del prototipo, se realizó la caracterización mecánica a tracción y flexión con la configuración de 75% fibra continua de abacá, 25% fibra de vidrio, con la finalidad de comparar las

propiedades mecánicas entre fracciones volumétricas y con las del prototipo. Estos resultados se muestran en la tabla 3.47.

Tabla 3.47. Propiedades mecánicas de la fracción volumétrica del 15%.

Propiedades a tracción			
	Promedio	Desviación estándar	CV
Esfuerzo máximo [MPa]	85,38	7,35	8,61
Módulo de elasticidad [MPa]	3975	418,79	10,53
Deformación a la rotura	0,0208	0,0005	2,73
Propiedades a flexión			
Esfuerzo máximo [MPa]	101,08	6,45	6,38
Módulo a la flexión [MPa]	5267	618,13	11,73
Deformación a la rotura	0,0236	0,0027	11,65

Las propiedades mecánicas de la fracción del 0,15 en comparación con la del 0,2 fueron: a tracción hubo un decremento del 38% para el esfuerzo y 11% para el módulo de elasticidad. En cuanto a las propiedades obtenidas a flexión, para el esfuerzo hubo un decremento del 19,6%, para el módulo a la flexión un incremento 3,3%.

3.2.5. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PROTOTIPO

Para el análisis del prototipo construido con el compuesto híbrido con la mejor combinación de propiedades mecánicas, se comparó el desempeño de éste con el material del prototipo original. Con los mismos parámetros usados en los ensayos anteriores se realizó el análisis estadístico de las propiedades mecánicas.

3.2.5.1. Propiedades físicas

Una de las propiedades físicas analizadas fue el peso tanto del modelo original como el del prototipo. Para el primero se registró 1313,5 g, mientras que para el segundo fue de 2007,8 g. La diferencia fue del 52,8%. El peso del prototipo fue demasiado elevado, por lo que se decidió modificar las dimensiones del mismo sin afectar el desempeño funcional de la patineta. Para esto, se construyó un segundo tablero de patineta de material compuesto híbrido de acuerdo con las dimensiones establecidas en catálogos de distintas marcas fabricantes de estos productos. Las medidas de los productos se presentan en la tabla 3.48. Con esta información se seleccionó el tablero más pequeño con la finalidad de reducir en mayor medida el peso del mismo.

Tabla 3.48. Dimensiones establecidas en catálogos de distintas marcas fabricantes de tableros de patinetas. [Internet 6; Internet 7; Internet 8]

Marca Fabricante	Element	Santa Cruz	Speed Demons
Ancho [cm]	19,05	19,05	18,74
Largo [cm]	79,37	78,74	78,74

El segundo prototipo construido tuvo un peso de 1415,2 g, que corresponde a una diferencia del 7,74% respecto al modelo original y de un 29,58% en relación al primer tablero construido.

Para comparar las dimensiones de los prototipos se tomó una medida por cada parámetro que se ilustra en la figura 3.74, para luego compararlos con el modelo original.

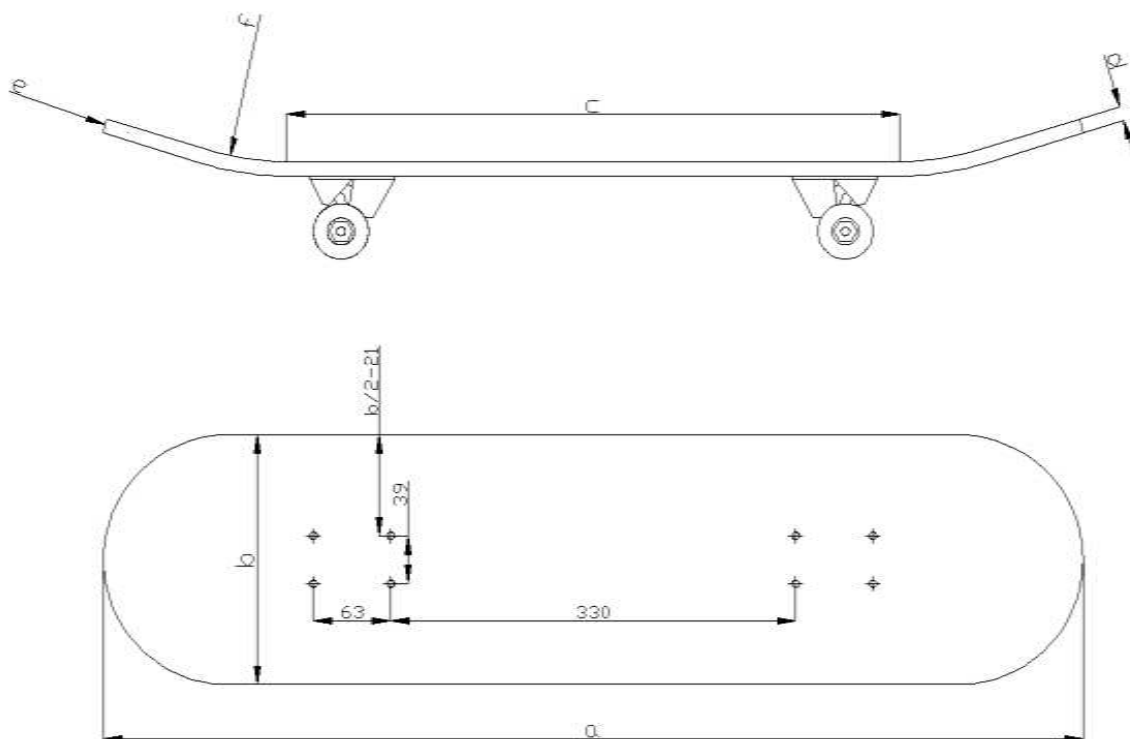


Figura 3.74. Esquema y dimensiones del prototipo de la patineta.

donde: a: longitud total de la patineta, b: ancho, c: longitud plana entre radios, d: espesor, e: radio de curvatura del contorno, f: radio de curvatura de forma.

En la tabla 3.49 se muestran las medidas de los prototipos y del modelo original, así como también el porcentaje de diferencia que se calculó como la diferencia de la medida del modelo original menos la del prototipo dividido para la dimensión del modelo original.

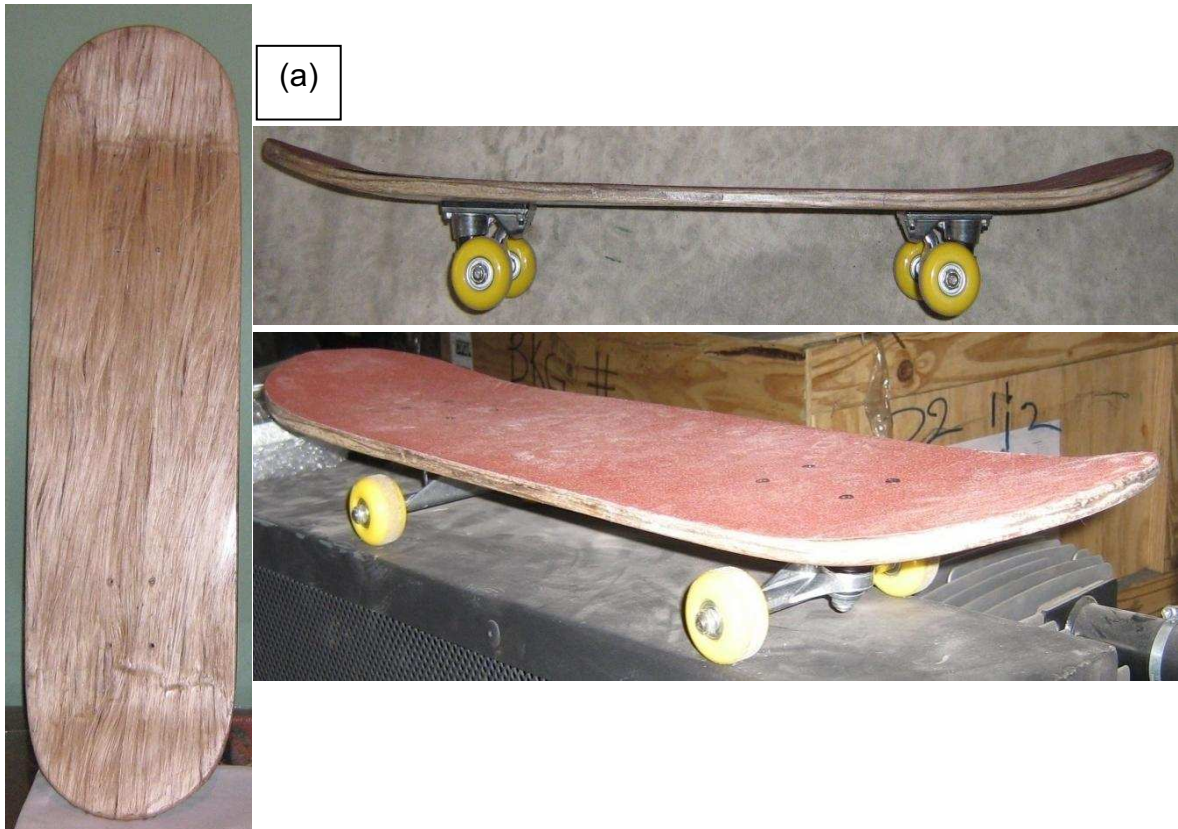
Tabla 3.49. Dimensiones del prototipo y del modelo original.

Dimensiones [mm]	Modelo original	Primer prototipo	Porcentaje de diferencia	Segundo prototipo	Porcentaje de diferencia
a	785	785	-	779	0,76
b	205	200	2,4	186	9,26
c	500,8	502	0,2	502	0,2
d	11,95	10,54	13,37	9	24
e	20	23	15	20	15
f	222	210	5,71	210	5,71

La mayor diferencia en las dimensiones radicó en el parámetro d, puesto que en el molde en el que se fabricó el prototipo no se tuvo un control adecuado en el espesor. Sin embargo, en las otras medidas la diferencia fue mínima, obteniendo

un prototipo muy semejante al tablero original. Los acabados superficiales del prototipo fueron aceptables, no presentaron rugosidades ni irregularidades y la presencia de burbujas fue mínima.

En la figura 3.75 se muestran las fotografías de la patineta original (a), del primer prototipo (b) y del segundo prototipo (c).



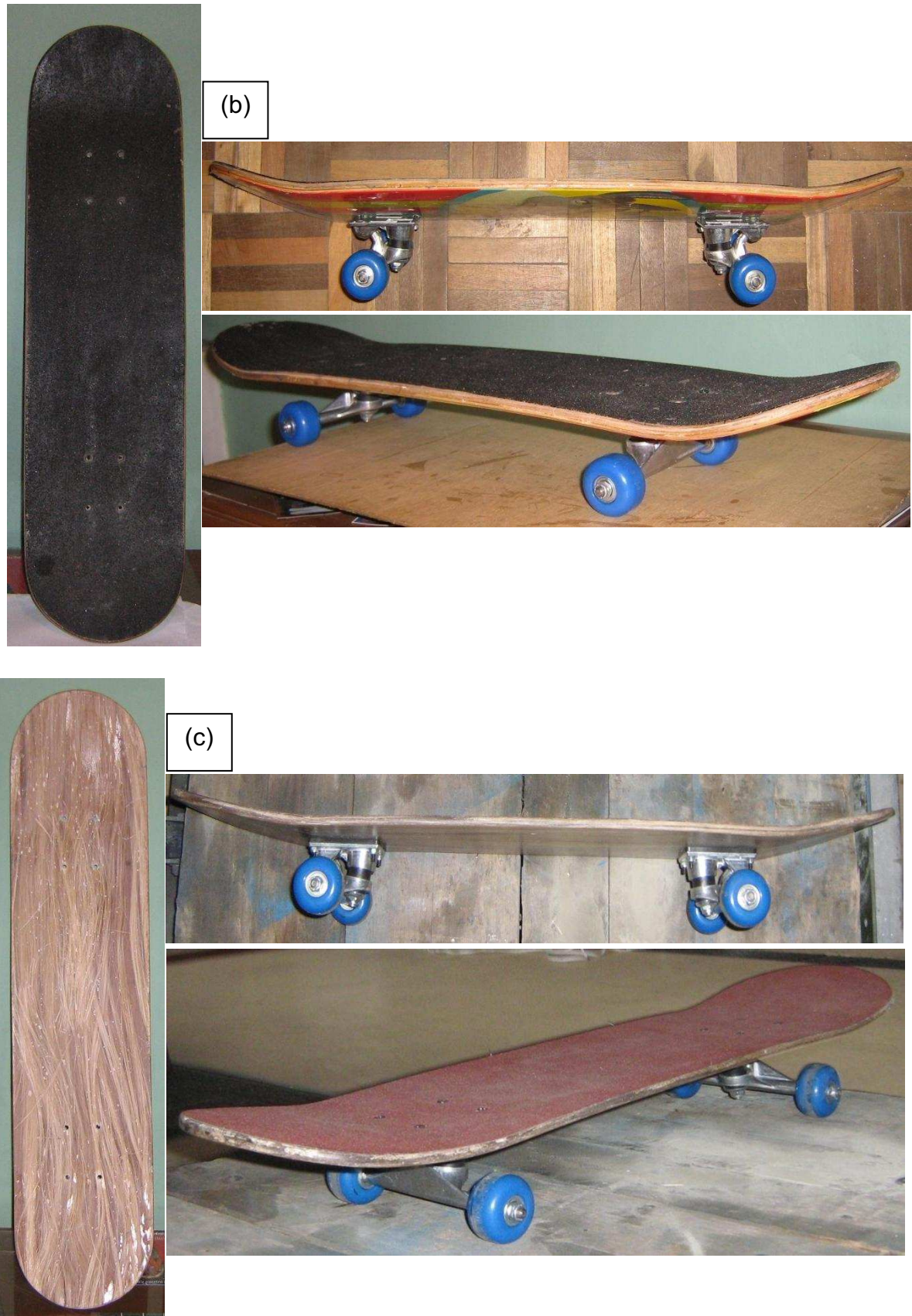


Figura 3.75. (a) Primer prototipo. (b) Modelo original. (c) Segundo prototipo.

3.2.5.2. Propiedades mecánicas

Se realizaron ensayos de tracción y flexión para el compuesto híbrido y el material del prototipo. De los datos obtenidos se calculó las propiedades mecánicas que a continuación se analizan. Cabe señalar que para estos ensayos se extrajeron probetas del modelo original, 5 probetas para el ensayo de tracción y 5 para el de flexión.

3.2.5.2.1. Ensayo de tracción

En la figura 3.76 se muestra el gráfico de medias para el esfuerzo máximo a la ruptura del compuesto híbrido de fibra de abacá-vidrio y de la madera contrachapada extraída del prototipo adquirido. El ANOVA permitió conocer que existió diferencia estadísticamente significativa entre estos dos materiales, la cual fue del 96,92%.

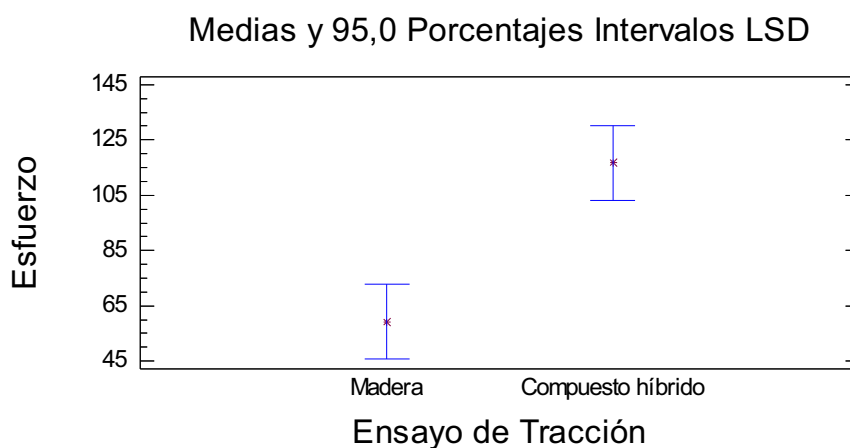


Figura 3.76. Esfuerzo máximo a la tracción del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.

El ANOVA mostró que no hubo diferencia estadísticamente significativa para la deformación unitaria entre el compuesto híbrido abacá-vidrio y la madera contrachapada. En la figura 3.77 se muestra el gráfico de medias para esta propiedad.

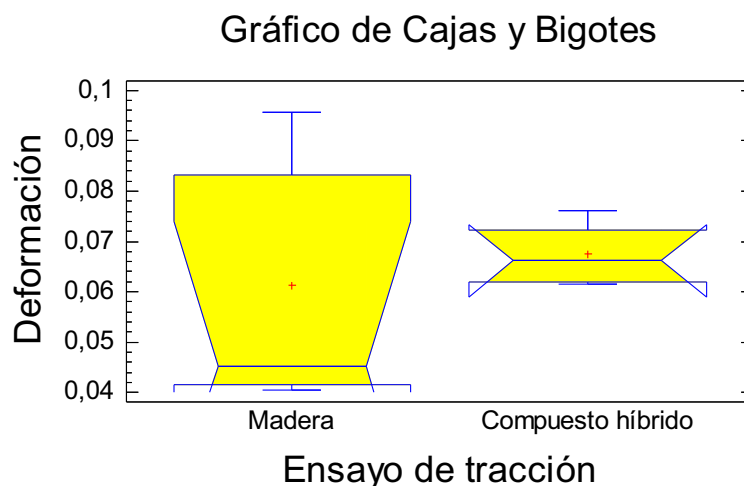


Figura 3.77. Deformación del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.

En la figura 3.78 se presenta el gráfico de medias para el módulo de elasticidad. El ANOVA permitió conocer que existió diferencia estadísticamente significativa para esta propiedad entre la madera y el compuesto híbrido, la cual fue del 109,61%.

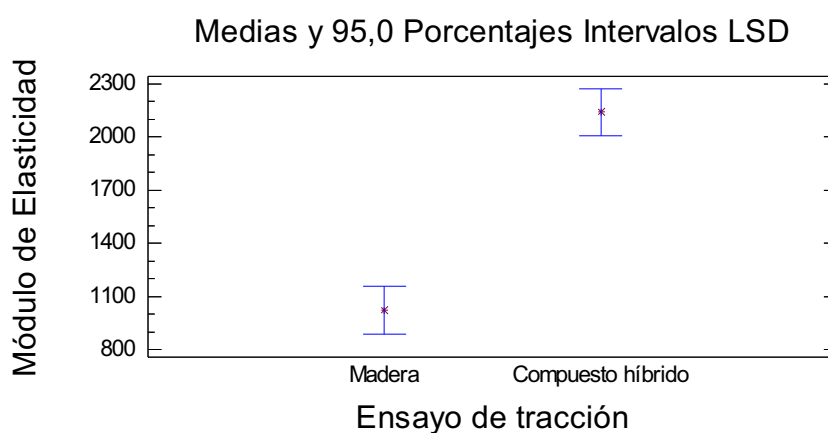


Figura 3.78. Módulo de elasticidad del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.

Para el esfuerzo y el módulo de elasticidad, el material compuesto híbrido presentó valores muy superiores a los de la madera, en cuanto a la deformación no hubo variación apreciable lo cual se puede explicar por la rigidez del híbrido.

En la figura 3.79 se presenta las curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de la madera contrachapada y del compuesto híbrido.

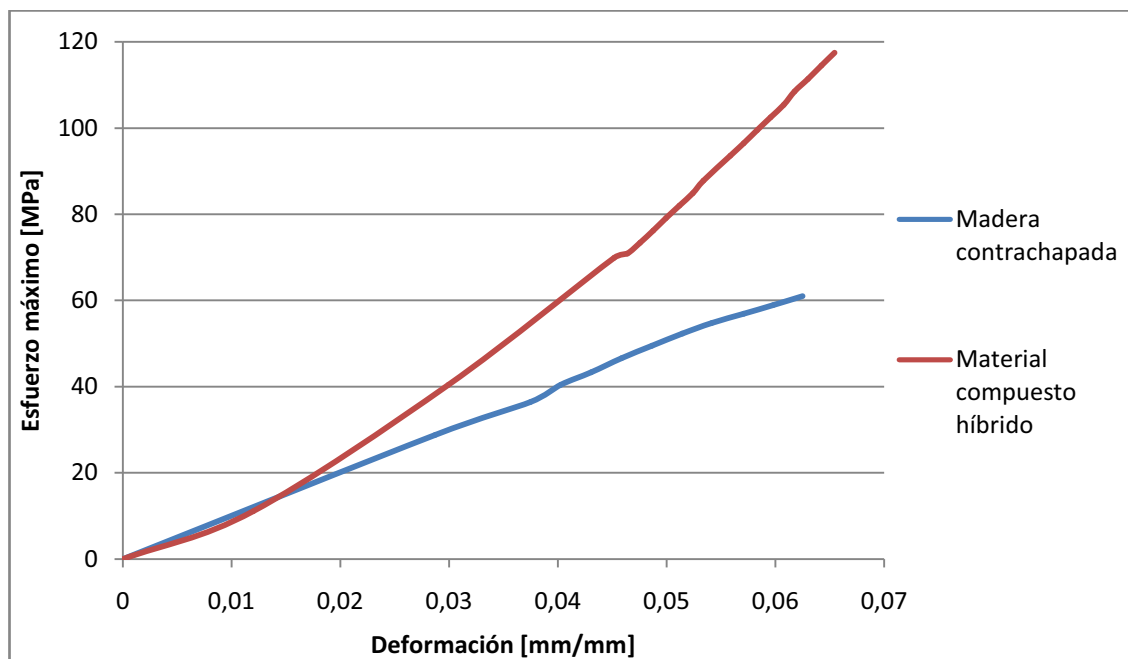


Figura 3.79. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de la madera contrachapada y del material compuesto híbrido.

Además se notó que la dispersión para el esfuerzo y la deformación de la madera fueron elevados. Esto podría explicarse a la falta de uniformidad en el proceso de fabricación entre lotes de producto final. En la tabla 3.50 se presenta el resumen de valores para las propiedades mencionadas.

Tabla 3.50. Resumen de las propiedades de los ensayos de tracción para la madera contrachapada y el compuesto híbrido.

Propiedad mecánica	Madera contrachapada	Compuesto híbrido
Esfuerzo máximo promedio[MPa]	59,26	116,7
Desviación estándar	21,31	15,33
CV	35,97	13,14
Porcentaje de diferencia	96,92	-
Deformación a la ruptura promedio	0,061	0,067
Desviación estándar	0,026	0,0064
CV	42,76	9,46
Porcentaje de decremento	10,45	-
Módulo de elasticidad promedio [MPa]	1020,84	2139,84
Desviación estándar	110,785	237,53
CV	10,85	11,1
Porcentaje de decremento	109,61	-

También se comparó las propiedades mecánicas a tracción del prototipo con los materiales compuestos híbridos con el 15 y 20 vol% de refuerzo, dichas propiedades se resumen en la tabla 3.51.

Tabla 3.51. Resumen de propiedades mecánicas a tracción de las fracciones volumétricas del 15 vol%, 20 vol% y del prototipo.

	Fracción volumétrica					
	0,15		0,2		Prototipo (0,15)	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Esfuerzo máximo [MPa]	85,38	7,35	137,77	7,13	116,7	15,33
Módulo de elasticidad [MPa]	3975	418,79	4472,6	260,95	2139,84	237,53
Deformación unitaria	0,0208	0,0005	0,0296	0,0011	0,06761	0,0064

El prototipo fue construido con el 15% de fracción volumétrica; sin embargo, los resultados no se aproximan a los del 0,15 en la experimentación. Esto se puede explicar a que del prototipo se extrajeron especímenes de ensayo que tuvieron una longitud 1,6 mayor a las probetas, por lo que a lo largo de las fibras se distribuyeron los esfuerzos inducidos como respuesta al material a las cargas externas aplicadas durante el ensayo. En cuanto a los resultados obtenidos con el material con el 20 vol% la mayor cantidad de refuerzo produjo valores más altos para este ensayo.

Cabe señalar que los valores de las propiedades analizadas pudieron variar en vista de que en la fabricación del prototipo no se utilizó la misma presión de moldeo empleada en las probetas de compuesto híbrido. Lo que sugiere, que en el prototipo las fibras de refuerzo no tienen la misma compactación a la matriz que las probetas. Además, para la caracterización mecánica de las probetas del 0,15 y 0,2 se utilizó distinta norma que para el material del prototipo, y por ende variaron parámetros influyentes en los resultados como la velocidad de ensayo y las dimensiones y formas de las probetas.

En la figura 3.80 se muestra las zonas de fractura de las probetas ensayadas a tracción.

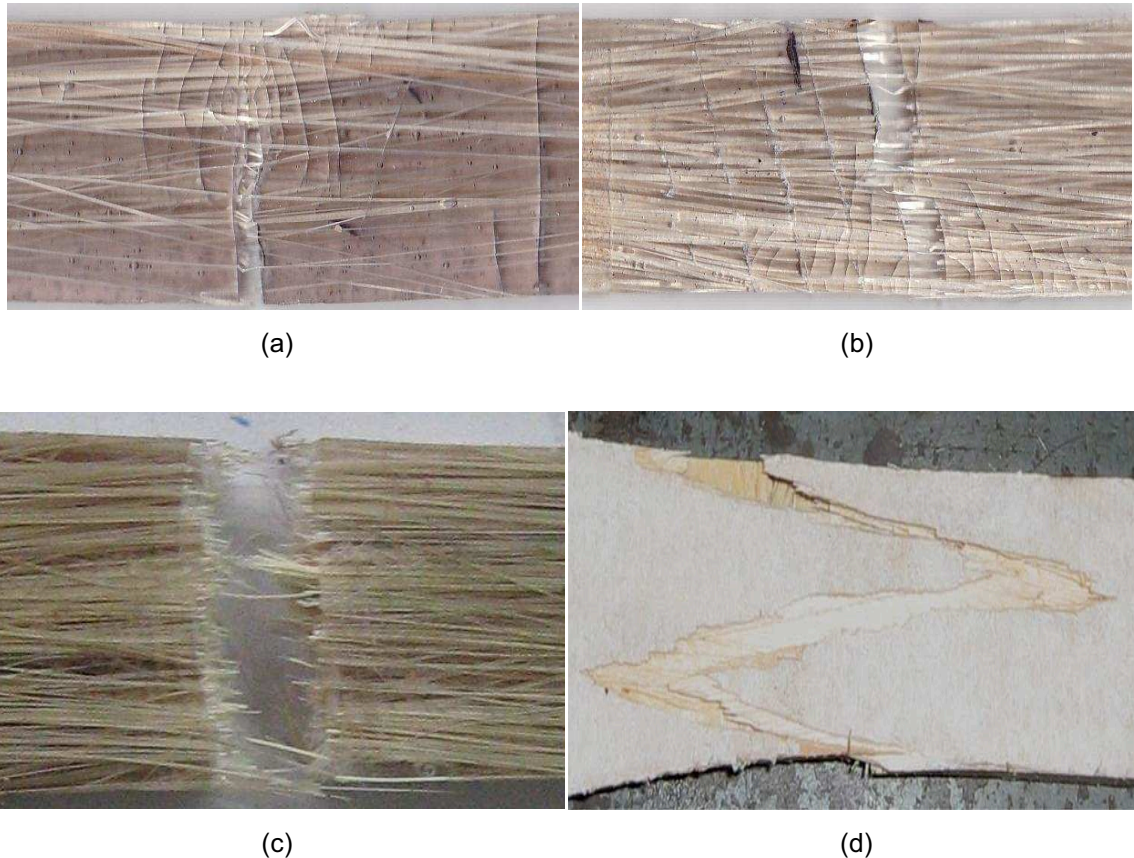


Figura 3.80. Zona de fractura de las probetas ensayadas a tracción. (a) Compuesto híbrido del 15 vol%. (b) Compuesto híbrido del 20 vol%. (c) Prototipo de compuesto híbrido. (d) Madera contrachapada.

En las proximidades de la fractura de las probetas (figuras a y b) se nota un fraccionamiento en la matriz, lo que sugiere que la falla primero sucedió en la matriz. Por lo que al incrementar la adhesión entre el refuerzo y la matriz las propiedades mecánicas podrían mejorar. En la probeta extraída del prototipo se aprecia pequeños agrietamientos en la matriz al igual que en las probetas. Se esperaría que al incrementar la presión de moldeo mejore la adhesión de las fibras y por ende sus propiedades. En la madera contrachapada la falla se produjo en las láminas de madera, las interfaces de dichas láminas permanecieron unidas.

3.2.5.2.2. Ensayo de flexión

El ANOVA indicó que existió diferencia estadísticamente significativa para el esfuerzo máximo a la flexión entre el compuesto híbrido y la madera contrachapada, dicha diferencia fue del 50,28%. En la figura 3.81 se muestra el gráfico de medias para esta propiedad.

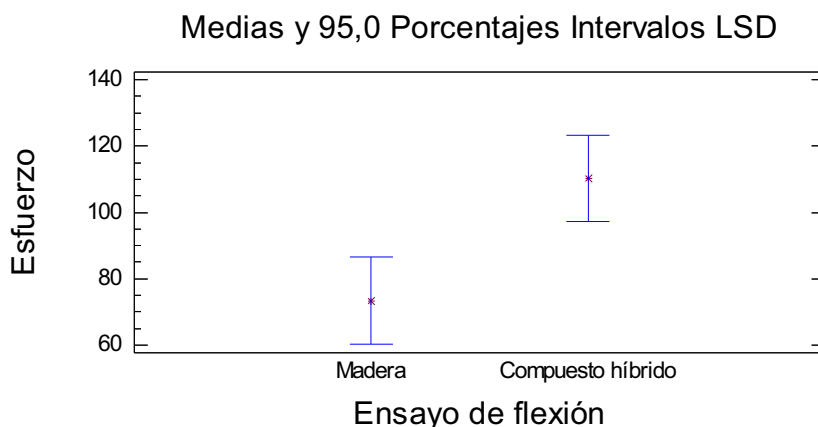


Figura 3.81. Esfuerzo máximo a la flexión del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.

En la figura 3.82 se presenta el gráfico de medias para la deformación de la madera contrachapada y el compuesto híbrido. El ANOVA mostró que hubo diferencia estadísticamente significativa entre estos materiales, la misma que fue del 47,6%.

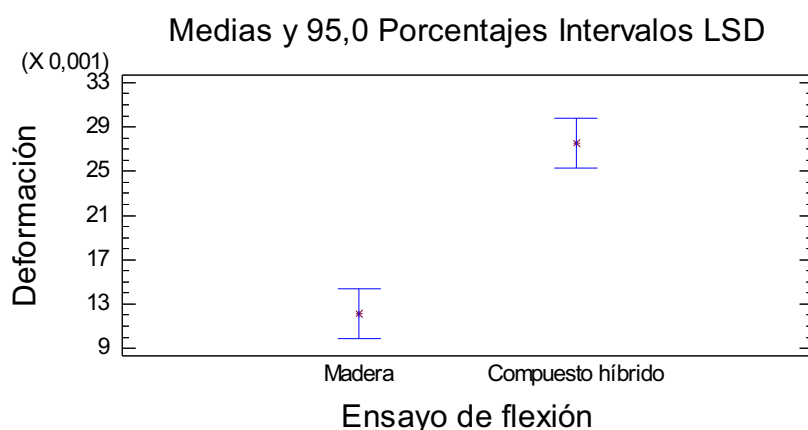


Figura 3.82. Deformación del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.

Solo para este caso se calcularon dos módulos de elasticidad en el material compuesto híbrido: el uno correspondiente al caso en que el esfuerzo está entre 0 y 0,25 del valor del esfuerzo máximo de la curva esfuerzo-deformación y el segundo denominado en el rango de datos asociado con valores de esfuerzo entre 0,25 y 0,75 del esfuerzo máximo de la curva ya mencionada.

El ANOVA indicó que no existió diferencia estadísticamente significativa entre los módulos de flexión y de trabajo del compuesto híbrido y el módulo de la madera contrachapada, sin embargo las diferencias entre estas propiedades fueron del 9 y 26,8%, respectivamente. En la figura 3.83 se muestra el gráfico de medias para esta propiedad.

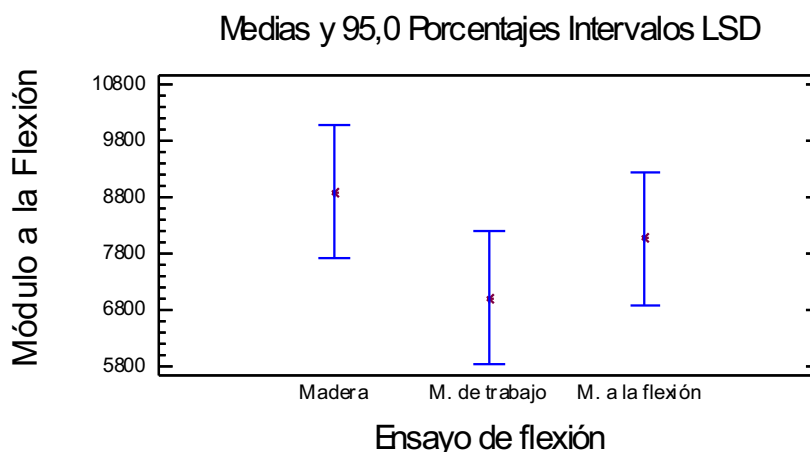


Figura 3.83. Módulo a la flexión y de trabajo del material compuesto híbrido abacá-vidrio y de la madera contrachapada.

En la figura 3.84 se muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de la madera contrachapada y el material compuesto híbrido.

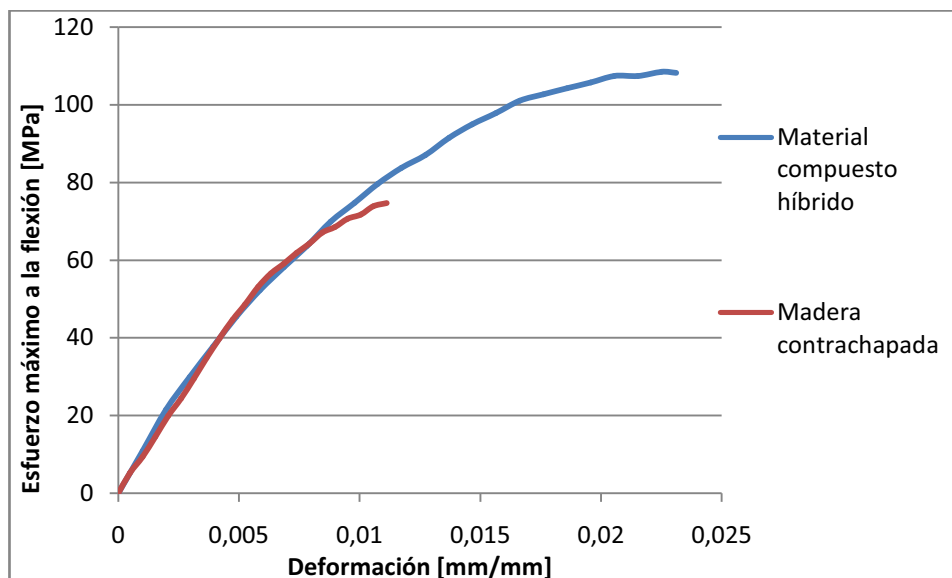


Figura 3.84. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de flexión a tres puntos de la madera contrachapada y del material compuesto híbrido.

En la tabla 3.52 se presenta el resumen de valores de las propiedades a flexión tanto del compuesto híbrido como de la madera contrachapada.

Tabla 3.52. Resumen de las propiedades de los ensayos de flexión para la madera contrachapada y el compuesto híbrido.

Propiedad mecánica	Madera contrachapada	Compuesto híbrido
Esfuerzo máximo promedio [MPa]	73,39	110,3
Desviación estándar	16,75	19
CV	22,83	17,22
Porcentaje de diferencia	50,28	-
Deformación a la ruptura promedio	0,012	0,027
Desviación estándar	0,001	0,003
CV	16,26	14,25
Porcentaje de decremento	47,6	-
Módulo a la flexión promedio [MPa]	8898,92	8071,4
Desviación estándar	2613,91	1331,32
CV	29,37	16,49
Porcentaje de decremento	-	9
Módulo de trabajo promedio [MPa]	8898,92	7016,84
Desviación estándar	2613,91	327,25
CV	29,37	4,66
Porcentaje de decremento	-	26,8

Para el módulo a la flexión de la madera contrachapada la dispersión fue elevada lo que se puede explicar por la falta de control durante la fabricación entre lotes

de producto. En cuanto a las dispersiones en las propiedades mecánicas del compuesto híbrido hubo un incremento respecto de las obtenidas en las probetas, lo que sugiere que al elaborar el prototipo fue más complicado tener una adecuada distribución de la fibra a lo largo del molde, sin embargo los valores del coeficiente de variación esta dentro del rango esperado en procesos de fabricación manual.

Además se comparó las propiedades a flexión del prototipo con las fracciones volumétricas del 15 y 20% de refuerzo híbrido, el resumen de dichas propiedades se muestran en la tabla 3.53.

Tabla 3.53. Resumen de propiedades mecánicas a flexión de probetas formuladas con las fracciones volumétricas del 15 vol%, 20 vol% y del prototipo.

	Fracción volumétrica					
	0,15		0,2		Prototipo (0,15)	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Esfuerzo máximo [MPa]	101,08	6,45	126,73	18,14	110,3	19
Módulo a la flexión [MPa]	5267	618,13	5091	948,63	7016,84	327,25
Deformación a la ruptura	0,0236	0,0027	0,0402	0,0020	0,0275	0,0039

Para el esfuerzo máximo a la flexión, las fracciones volumétricas del 15 y 20% comparada con el prototipo no tuvo mayor diferencia apreciable, lo contrario ocurrió con el módulo a la flexión lo cual se explicaría porque los ensayos se realizaron con distintas normas, por ende a distintas velocidades y espacio entre apoyos del ensayo, lo cual influiría en los resultados para esta propiedad.

Las propiedades mecánicas varían entre las formulaciones híbridas del 15 y 20 vol% y el prototipo esto puede deberse a que las probetas extraídas del prototipo son aproximadamente 3,5 veces mayos a los especímenes de ensayo de las formulaciones mencionadas, por lo que los esfuerzos inducidos como respuesta del material ante las cargas exteriores aplicadas durante el ensayo se distribuyeron a lo largo de las fibras.

En la figura 3.85 se muestra las zonas de fractura de las probetas ensayadas a flexión.

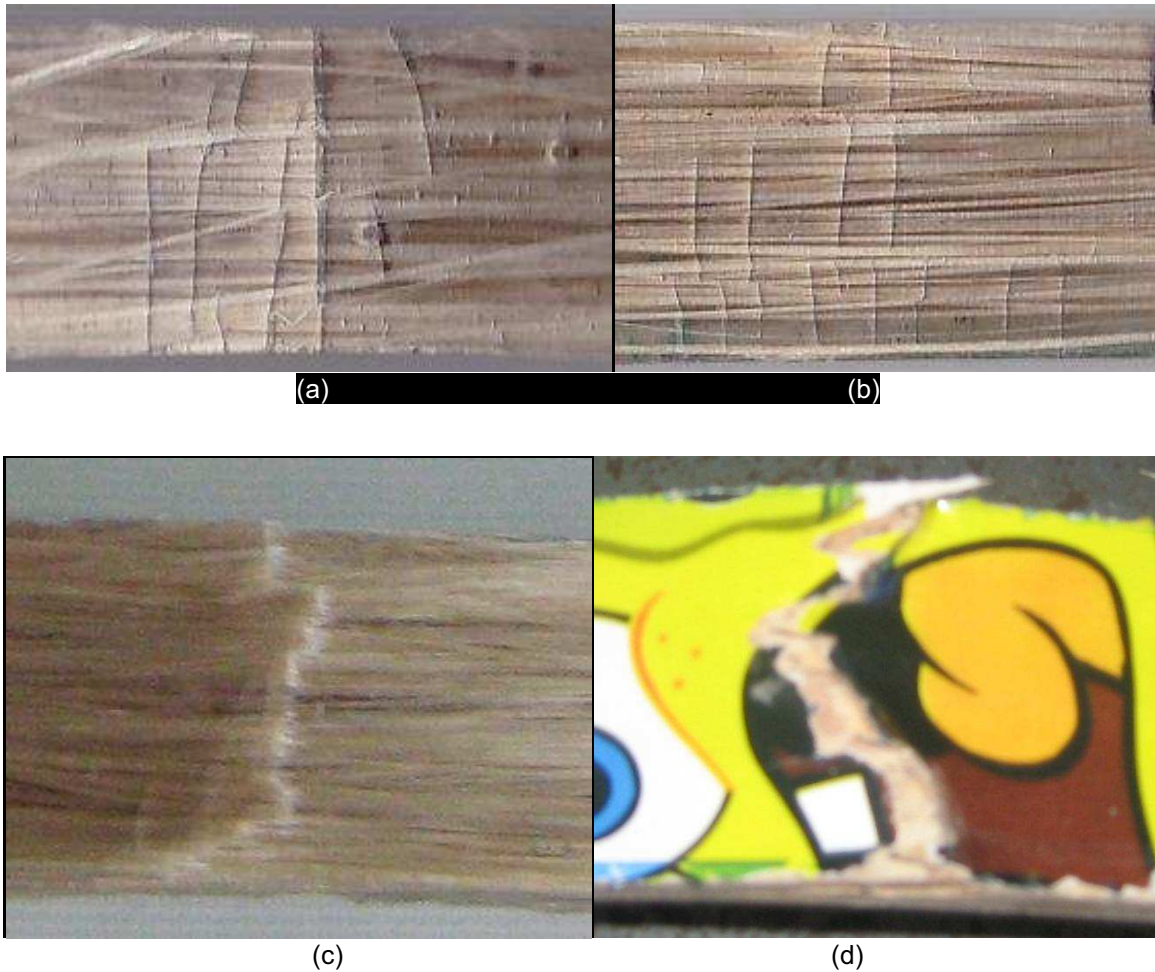


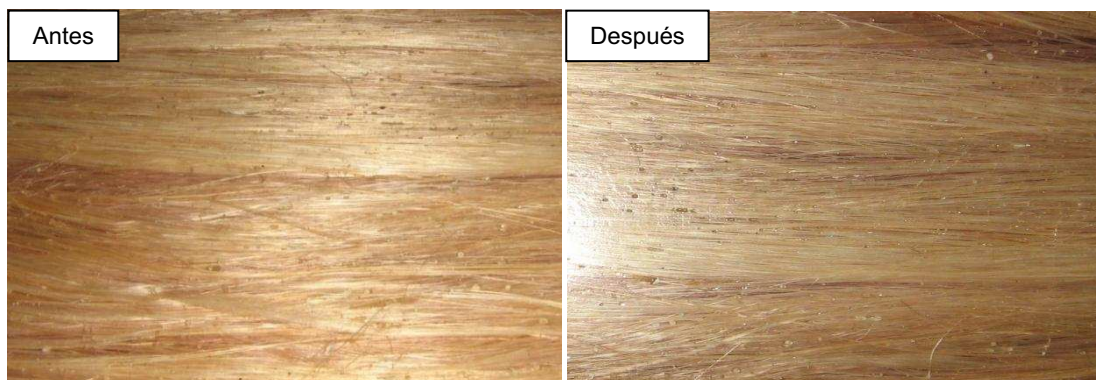
Figura 3.85. Zona de fractura de las probetas ensayadas a flexión. (a) Compuesto híbrido del 15 vol%. (b) Compuesto híbrido del 20 vol%. (c) Prototipo de compuesto híbrido. (d) Madera contrachapa.

En las probetas (figura a y b) la fractura se visualiza solo como resquebrajamientos en la matriz, lo que sugiere que por la curvatura que adopta la probeta durante el ensayo las fibras se desprenden de la matriz provocando la falla prematura en esta. Mientras que en la probeta extraída del prototipo se nota que la fractura provocó que las capas de refuerzo fallaran.

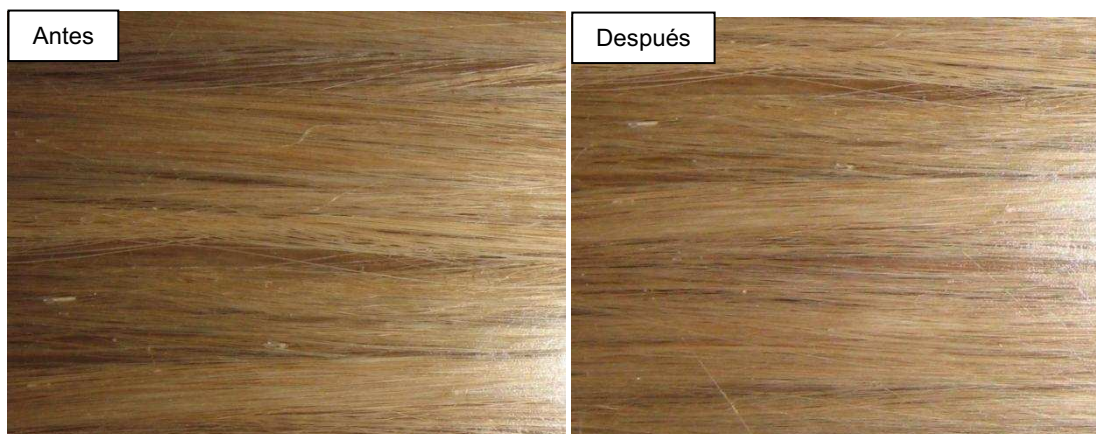
3.2.5.2.3. Prueba funcional

Como requerimiento de uso, los prototipos estarán sometidos a reiteradas cargas de impacto, por lo que se simuló su funcionamiento al impactarlos con un peso de 66 kg desde una altura de 50 cm por 20 veces. Posteriormente se inspeccionaron si en ellos se generaron grietas o algún defecto, a causa de las cargas recibidas.

Se seleccionó el peso mencionado tomando en cuenta el peso promedio de una persona que practique este deporte, la altura de impacto estimando que aproximadamente a esa elevación se realizan maniobras exigentes y se propuso el número de veces de impacto considerando que el prototipo este sometido una prueba exigente por reiterados ciclos como requerimiento de prueba. En la figura 3.86 se presentan las superficies de los prototipos antes y después de esta prueba.



(a)



(b)

Figura 3.86. Superficies antes y después del ensayo. (a) Primer prototipo. (b) Segundo prototipo.

Se puede apreciar en la figura que no hubo raspones, ni grietas a causa de los impactos aplicados. La energía de impacto absorbida por el prototipo fue de 323,4 J.

Por otro lado se usó el mismo mecanismo de sujeción utilizado en el modelo original para unir el tablero a las ruedas, el cual fue el de tornillos y tuercas. Los agujeros en el tablero fueron avellanados para ocultar la cabeza de los tornillos. El tablero unido a las ruedas se muestra en la figura 3.87.



Figura 3.87. Mecanismo de unión entre el tablero y las ruedas.

3.2.6. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Finalmente se estimó en el costo de los materiales utilizados en la fabricación del prototipo en comparación con el tablero original. Estos valores se resumen en la tabla 3.54.

Tabla 3.54. Costos de fabricación del prototipo de la patineta.

Material	Costo unitario	Cantidad utilizada	Costo
Poliéster	3,341 [USD/l]	1,4448	4,82
Fibra de abacá	1,2 [USD/kg]	0,2304	0,27
Fibra de vidrio	1,615 [USD/kg]	0,3523	0,56
Estireno	2,36 [USD/l]	0,1589	0,37
Octoato de cobalto	25 [USD/l]	0,00722	0,18
MEKP	8,3 [USD/l]	0,01083	0,089
Costo total [USD]			6,28

Al costo de fabricación de los materiales del prototipo se sumó el 10% por concepto de pérdidas de material durante el moldeo. Además, el costo por mano de obra, considerando que este trabajo puede realizarlo una persona que ganará el salario mínimo vital. En construir el prototipo se invierte aproximadamente 6,5 horas, el costo por mano de obra por una patineta es de 6 USD.

Finalmente hay que considerar el costo de reposición del molde, el costo del mismo es de aproximadamente 40 USD y con el que se podría fabricar alrededor de 120 patinetas el costo es de 0,33 USD. También el costo del corte de la patineta y el taladrado se consideró estas dos operaciones en aproximadamente 1 USD.

Sumando todos los rubros el costo de la patineta es de 14,23 USD. El precio comercial de la patineta de madera fue de 15 USD por lo que la fabricada con el compuesto híbrido es un 5,13% más económica respecto a la original.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que el molde macho-hembra genera menor cantidad de defectos en la superficie de las probetas, lo que permitió obtener especímenes de ensayo sin concentradores de esfuerzos a causa de los defectos.
- Se definió la presión de moldeo de 1000 psi, la cual fue adecuada para obtener probetas con las dimensiones descritas en la norma usada para la experimentación.
- Se definieron las concentraciones volumétricas de los parámetros de procesamiento óptimos los cuales fueron: 1,1% de estireno, 0,5% de iniciador y 0,75% de catalizador para la elaboración de probetas de material compuesto híbrido. Al establecer estos parámetros se pudo estratificar los materiales en un tiempo adecuado.
- Para la elaboración del prototipo se utilizaron los mismos parámetros utilizados en la fabricación de los especímenes de ensayo, excepto en la cantidad de catalizador, el cual fue del 0,5%, que se disminuyó con la finalidad de retrasar el tiempo de curado y conseguir laminar el prototipo de dimensiones mucho más grandes que las probetas. Además se cambió la presión de moldeo que fue de 1,1 psi.
- Se estableció en los ensayos preliminares que la fracción volumétrica del 20% presentó mejores propiedades mecánicas a tracción, la misma se utilizó en la fabricación de material compuesto híbrido.

- Se elaboraron probetas de material compuesto híbrido mediante estratificación manual, considerando variables como: la configuración del refuerzo híbrido y la fracción volumétrica de los refuerzos. Los arreglos de fibra de abacá fueron de fibra corta, longitudinal, tejido plano y sarga. Y las formulaciones fueron del 25-75%, 50-50% y 75-25% fibra natural-fibra sintética.
- Se caracterizaron mecánicamente las probetas de materiales compuestos obtenidas a través de ensayos de tracción y flexión, las curvas esfuerzo-deformación de los compuestos presentaron un comportamiento lineal en tracción y en flexión mostraron un comportamiento no lineal. La mayoría de los datos recabados en los ensayos siguieron una distribución normal, a las formulaciones que incumplieron con las restricciones de normalidad se las analizó mediante el método de Kruskal-Wallis.

En base a los ensayos mencionados se determinó la formulación con la mejor combinación de propiedades, la cual presentó los siguientes resultados.

Tracción

- El compuesto reforzado con el 75% de fibra orientada longitudinalmente de abacá y el 25% de fibra de vidrio presentó incrementos en el esfuerzo máximo a la ruptura del 58,32% y 55,5% en relación con los materiales compuestos de fibra de vidrio y abacá, respectivamente.
- En cuanto al módulo de elasticidad, el compuesto mencionado presentó con relación a los compuestos de fibra de vidrio y fibra longitudinal de abacá incrementos del 31,35% y del 4,7%, respectivamente.
- En la configuración de fibra orientada longitudinalmente de abacá, el refuerzo estuvo orientado en la misma dirección de aplicación de la carga lo cual influyó en los resultados obtenidos. Sin embargo, por

esta condición el material es anisotrópico por lo que ante cargas transversales a la fibra las propiedades mecánicas serían inferiores.

Flexión

- Dentro de los compuestos con 20 vol% de refuerzo híbrido la formulación del 50% de fibra longitudinal de abacá y 50% de fibra de vidrio presentó un incremento del 114,76% respecto a la matriz, para el esfuerzo máximo a la flexión.
- El compuesto mencionado mostró un incremento del 141,91% respecto a la matriz, para el módulo a la flexión.
- Entre las formulaciones del 50% y 75% fibra longitudinal no hubo diferencia considerable para el esfuerzo y módulo a la flexión, en contraste a las propiedades a la tracción donde la formulación con el mayor contenido de fibra natural mostró valores superiores.
- La formulación con la mejor combinación de propiedades fue la del 75% de fibra longitudinal de abacá y 25% de fibra de vidrio, con valores promedio de esfuerzo máximo a la tracción y flexión de 137,77 y 126,73 MPa, respectivamente. En cuanto a los módulos de elasticidad y flexión fueron de 4472,6 y 5091 MPa, respectivamente.
- Con la mejor formulación se elaboró probetas para ensayos de impacto, del cual se conoció que el compuesto híbrido tuvo una resistencia al impacto de 0,492 J, con un decremento en esta propiedad del 3,25% respecto al compuesto reforzado con fibra de vidrio.

Evaluación de las propiedades del prototipo

- En el ensayo a tracción del prototipo construido de material compuesto híbrido presentó un valor de 116,7 MPa para el esfuerzo máximo a la ruptura, que representa un incremento del 96,9% respecto a la madera del modelo original.

- El módulo de elasticidad a tracción del compuesto híbrido fue de 2139,84 MPa, que corresponde a una mejoría del 109,6% respecto a la madera del tablero original.
- En cuanto a los resultados obtenidos en los ensayos de flexión del compuesto híbrido, el esfuerzo máximo promedio fue de 110,3 MPa, el cual representa un incremento del 50,3% respecto a la madera.
- Los módulos de flexión y de trabajo del compuesto híbrido fueron de 8071,4 y 7016,84 MPa, que corresponde a decrementos en relación al módulo de la madera del tablero original del 9 y 26,8%, respectivamente. Por otro lado la deformación del compuesto híbrido fue de 0,0275 que corresponde a un aumento del 127% respecto al tablero del modelo original
- En la prueba funcional el prototipo absorbió una energía de impacto de 323,4 J por 20 veces, sin presentar grietas ni raspones después del ensayo.

4.2. RECOMENDACIONES

- Para evaluar la influencia de la interfaz fibra matriz se recomienda continuar con la investigación realizando distintos tipos de tratamientos superficiales en la fibra de abacá y comparar los resultados con los obtenidos en el presente proyecto de investigación.
- La configuración de la fibra longitudinal de abacá hace que el material sea anisotrópico, por lo cual se sugiere realizar ensayos mecánicos con la fibra orientada transversalmente al sentido de la carga para tener una idea del grado de diferencia en las propiedades del compuesto cuando sea sometido a cargas biaxiales, con esta información se podría profundizar en la búsqueda de otras posibles aplicaciones industriales.

- Se podría obtener y caracterizar materiales compuestos con la configuración desarrollada en el presente proyecto con distintas matrices a fin de evaluar su desempeño y buscar más aplicaciones industriales.
- La posibilidad de adicionar más refuerzo híbrido, en teoría incrementaría las propiedades mecánicas obtenidas, así como también se podría evaluar la influencia de la configuración de las capas de refuerzo híbrido.

BIBLIOGRAFÍA

- AZEVEDO, A., COSTA, I., FREIRE, E. “Efeito do Teor de Umidade em Compósitos Híbridos Vidro / Juta”. 2004. <http://www.abcm.org.br>. (Agosto, 2010)
- BARGHOORN, P., STEBANI, U., BALSAM, M. Trends in Polymer Chemistry 1997. Part 2: Applied Macromolecular Chemistry. WILEY-VCH. 1998
- BARROS, A., AQUINO, E., RODRIGUES, L., DA SILVA, R. “Laminados compósitos a base de fibras natural e sintética: Efeito de condições ambientais adversas”. 2006. <http://www.metallum.com.br>. (Agosto, 2010)
- CARVALHO, L., CAVALCANTI, W. “Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro”. 2006. <http://www.scielo.br>. (Agosto 2010)
- CERÓN, P. “Estudio de factibilidad para implementar una empresa de exportación de fibra de abacá”. Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero en Ciencias Económicas y Financieras. EPN. Quito. Ecuador. 2006
- CHAND, N., Tribology of Natural Fiber Polymer Composites, CRC Press, 2008
- CHANDA, M., Plastics Technology Handbook, CRC Press, 2007.
- CHEREMISINOFF, N., CHEREMISINOFF, P., Fiberglass Reinforced Plastics. Noyes Publications. 1995.
- CHIellini, E., Biorelated Polymers: Sustainable Polymer Science and Technology. Kluwer Academic/Plenum. 2001.
- CHOU, T., Microstructural Design of Fiber Composites. Cambridge University Press. 1992.

- FREITAS, Alysso. “Compósitos Híbridos: Desenvolvimento de Configuração e Efeitos de Umidificação”. 2006. <http://www.fmu.ufrn.br> (Noviembre, 2010)
- GORDON, J., Handbook of textile fibres, Vol. 1. Wood head Publishing. 1964.
- GUERRERO, V., PONTÓN, P., “Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá mediante estratificación manual”. Quito. Ecuador. 2010.
- HEARLE, J., High-performance Fibers, CRC Press, 2001
- HOA, S., Principles of the Manufacturing of Composite Materials. Destech Publicatons. 2009.
- HOLLAWAY, L., Handbook of polymer composites for engineers. Woodhead Publishing Limited. 1994.
- HULL, Derek. Materiales Compuestos. Reverté, S. A. 2003
- JUNIOR, O., OLIVEIRA, F., SILVA, D. “Caracterização mecânica, térmica e perfil de absorção de água de compósitos híbridos de fibra de vidro/fibra de pupunheira em matriz poliéster insaturado”. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.5.1. 2009. <http://www.dema.ufcg.edu.br>. (Agosto, 2010)
- LEATHAM, D., PAREJA, L., SALAZAR, W., BOCARDO, C. “Economic Factors Affecting the Production of Abacá in Ecuador”, 2000. <http://www.sica.gov.ec/> (Marzo, 2010)
- LEWIN, M., Handbook of Fiber Chemistry Taylor & Francis Group. Third Edition. 2007.
- LLOP, M., LÓPEZ, J., LÓPEZ, A., VILASECA, F., MUTJÉ, P. “Influencia de la Modificación de las Fibras Sobre las Características a Fractura de un Poliestireno Reforzado con Fibras de Yute”, Anales de Mecánica de la

Fractura, volumen 22, 2005, <http://www.gef.es/Congresos/22/PDF/50.pdf>, (Enero, 2011)

- MAHMOOD, Husein. Mechanics of Fibrous Composites. Elsevier Science Publishers Ltd. 1991
- MALDONADO, A., PAREDES, J., “Obtención y caracterización mecánica de compuestos de políester reforzados con fibras de abacá”. Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico. EPN. Quito. Ecuador. 2010
- MALDONADO, L. “Situación Actual de la Producción y Comercialización del baca en el Ecuador”, Primer Encuentro Nacional de Productores y Artesanos de Fibras Naturales: Memorias técnicas, 2000. <http://biblioteca.espe.edu.ec/> (Marzo 2010)
- MALLICK, P., Fiber-reinforced Composites, Marcel Dekker, Inc, Second Edition, 1993
- MAZUMDAR, Sanjay. Composites Manufacturing. CRC Press LLC. 2002
- MIRAVETE, A., CUARTERO, J., Materiales Compuestos, Volumen 1, AEMAC, 2003, <http://books.google.com.ec/books>, (Enero 2011)
- MIRAVETE, A., Materiales Compuestos I. Reverte S. A. 2007. <http://books.google.com.ec/books>. (Marzo 2010)
- MOHANTY, A., MISRA, M., DRZAL, L. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis Group. 2005
- OKSMAN, Kristiina. SAIN, Mohini. Wood-polymer Composites. Woodhead Publishing Limited. 2008
- PÁEZ, J. “Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión”, Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, EPN, Quito, Ecuador. 2007

- PAIVA, J., FROLLINI, E., “Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar”, 1999, <http://www.scielo.br> (Junio 2011)
- PETERS, S., Handbook of Composites, Chapman & Hall, Second Edition, 1998
- PICKERING, Kim. Properties and performance of natural-fibre composites. Woodhead Publishing Limited. 2008
- PIGGOT, Michael. Load Bearing Fibre Composites. Kluwer Academic Publishers. 2nd Edition. 2002
- PIZZI, A., MITTAL, K. Handbook of Adhesive Technology. Taylor & Francis Group, LLC. 2003
- PONTÓN, P. “Estudio del efecto de encolado de fibra de abacá en el mejoramiento de su capacidad de tisaje”, Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador. 2009.
- SMITH, William. Ciencia e Ingeniería de Materiales. McGraw-Hill. 3ra edición. 2004.
- VILARIM, R., “Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais”, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo. Brasil, 2003, <http://www.teses.usp.br/teses/.../88/.../teseRosanaVilarimdaSilva.pdf>, (Junio, 2011)
- WALLENBERGER, F., BINGHAM, P., Fiberglass and Glass Technology. Springer. 2010.
- [CADE],
http://www.sica.gov.ec/agronegocios/productos%20para%20invertir/fibras/abaca/abaca_cade.htm. (Marzo 2010)
- [FAO], Año Internacional de las Fibras. 2009.
<http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/abaca.html>. (Abril 2010)

- [Internet 1] <http://www.textil.org/extranet/inf/Revista18/pag19.pdf>
- [Internet 2]
http://www.easybizchina.com/product/d360528/filament_winding_roving.html
- [Internet 3] <http://www.abacaphilippines.com>
- [Internet 4]
<http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Compuestos%20Fabricacion.pdf>
- [Internet 5] <http://catalog.elementskateboards.com>
- [Internet 6]
<http://www.elementskateboards.com/us/skateboards/view/7740/TeamEditionCollection/TeamEditionQuarter>
- [Internet 7] <http://www.nhsfunfactory.com/brands/santacruz/1/Decks/6/>
- [Internet 8] http://www.speeddemonsskateboards.com/spring11_catalog/

ANEXOS

ANEXO 1.	ELEMENTOS DE LOS COMPUESTOS LIGNOCELULÓSICOS .	190
A1.1.	MATRIZ	190
A1.2.	REFUERZO	190
A1.3.	AGENTES COMPATIBILIZANTES	191
ANEXO 2.	PLANOS DE LOS MOLDES DE TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO.....	193
ANEXO 3.	CANTIDAD DE FIBRA ADICIONADA EN LAS PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	194
ANEXO 4.	PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS TEJIDOS PLANO Y SARGA	196
ANEXO 5.	MANEJO DEL PROGRAMA STATGRAPHICS Plus 5.1.	200
ANEXO 6.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO.....	203

ANEXO 1. ELEMENTOS DE LOS COMPUESTOS LIGNOCELULÓSICOS

A1.1. MATRIZ

Las funciones de la matriz en un material compuesto son: servir de medio para que las fibras de refuerzo se mantengan ordenadas; transferir las cargas y sollicitaciones mecánicas hacia el material de refuerzo; proveer una barrera de protección para el refuerzo contra los efectos dañinos del medio ambiente (humedad) y; proteger la superficie del refuerzo de la degradación. [Chiellini, 2001]

A1.2. REFUERZO

Las propiedades de la matriz, en este caso un polímero, pueden ser incrementados significativamente por medio del refuerzo. Este es el principal objetivo del refuerzo, conjuntamente con una reducción sustancial de los costos del compuesto obtenido.

El refuerzo generalmente se añade a la matriz en forma de fibras porque en esta forma se obtiene la máxima resistencia en el compuesto final. Varios tipos de materiales pueden ser usados como fibras de refuerzo, por ejemplo: fibra de vidrio, carbón, asbesto, polímeros sintéticos como la fibra de kevlar, y últimamente fibras naturales como las de madera, entre otros.

La elección del refuerzo depende principalmente de las propiedades que se requieren en el compuesto final. Además, entre otros factores para la selección de fibras de refuerzo adecuadas para determinada aplicación, se tiene: elongación máxima, resistencia térmica, adhesión fibra-matriz, comportamiento dinámico, tiempo de vida útil, y los precios y costos de procesamiento [Chiellini, 2001].

En la tabla A1 se presenta una lista de diferentes materiales que se usan como refuerzos y las propiedades que proporcionan a los plásticos.

Tabla A1. Materiales usados como refuerzo y propiedades que proporcionan al plástico
[Cheremisinoff, 1995].

Refuerzo	Resist. química	Resist. Térmica	Aislamiento eléctrico	Resist. impacto	Resist. tracción	Estabilidad dimensional	Rigidez	Dureza	Resist. humedad
Asbesto	x	x	x	x		x	x	x	
Carbonato de calcio		x				x	x	x	
Fibra de carbón									
Celulosa				x	x	x	x	x	
Carbón (en polvo)	x								x
Algodón (fibras recortadas)			x	x	x	x	x	x	
Fibra de vidrio	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Yute				x			x		
Caolín	x	x				x	x	x	x
Mica	x	x	x			x	x	x	x
Nylon (fibras recortadas)	x	x	x	x	x	x	x	x	
Talco	x	x	x			x	x	x	x
Aserrín			x		x	x			

A1.3. AGENTES COMPATIBILIZANTES

El desarrollo de la calidad de los materiales compuestos, en particular de los WPCs, está limitado a dos restricciones físicas: la temperatura máxima de procesamiento de la madera y la diferencia entre la energía superficial de la madera y la matriz polimérica. La madera puede ser procesada a temperaturas de hasta 230 °C. Sobre este límite la madera se degrada. La segunda restricción: la diferencia entre las energías superficiales, provoca que la fuerza de adhesión fibra-matriz disminuya y esto conduce a una notable disminución de las propiedades físicas finales del compuesto. Por ello, en la mayoría de los casos, es necesario compatibilizar o acoplar la mezcla.

El acoplamiento es un proceso donde materiales disímiles (el polímero y/o el material de refuerzo) se unen en una sola mezcla mediante el uso de agentes externos denominados agentes compatibilizantes. Este proceso puede llevarse a cabo de cuatro formas diferentes: modificación de la matriz, modificación del

refuerzo, adición de agentes activos superficiales y mediante mezclado sometido a altos esfuerzos de cizalladura.

Las características que los compatibilizantes proporcionan a la mezcla son la mejora de la adhesión interfacial y una adecuada distribución del refuerzo, facilitando de esta manera el procesamiento. Uno de los compatibilizantes más comunes usados actualmente es el anhídrido maleico (MAPP). [Mohanty, 2005]

ANEXO 2. PLANOS DE LOS MOLDES DE TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO

ANEXO 3. CANTIDAD DE FIBRA ADICIONADA EN LAS PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

El cálculo de la cantidad de fibra a ser adicionada para obtener una determinada fracción volumétrica nominal de fibra se realizó de la siguiente manera:

$$m_{fibra} = X_{global} V \rho_{fibra} x_{parcial}$$

donde:

m_{fibra} : masa de fibra.

X_{global} : fracción volumétrica global.

V : volumen de la probeta.

ρ_{fibra} : densidad de la fibra.

$x_{parcial}$: fracción volumétrica parcial.

Tabla A2. Cantidad de fibra adicionada para la elaboración de probetas.

Probetas de Tracción			
Fracción volumétrica 20%			
Fibra	25%abacá/75%vidrio	50%abacá/50%vidrio	75%abacá/25%vidrio
Abacá [g]	1.02	2.03	3.05
Vidrio [g]	6	3.98	2
Fracción volumétrica 15%			
Abacá [g]	-	-	2.3
Vidrio [g]	-	-	1.5
Probetas de Flexión			
Fracción volumétrica 20%			
Abacá [g]	0.54	1.08	1.62
Vidrio [g]	3.18	2.12	1.06
Fracción volumétrica 15%			
Abacá [g]	-	-	1.2
Vidrio [g]	-	-	0.8

En la figura A1 se muestra el diagrama de procesos seguido en la fabricación de las probetas de material compuesto híbrido.

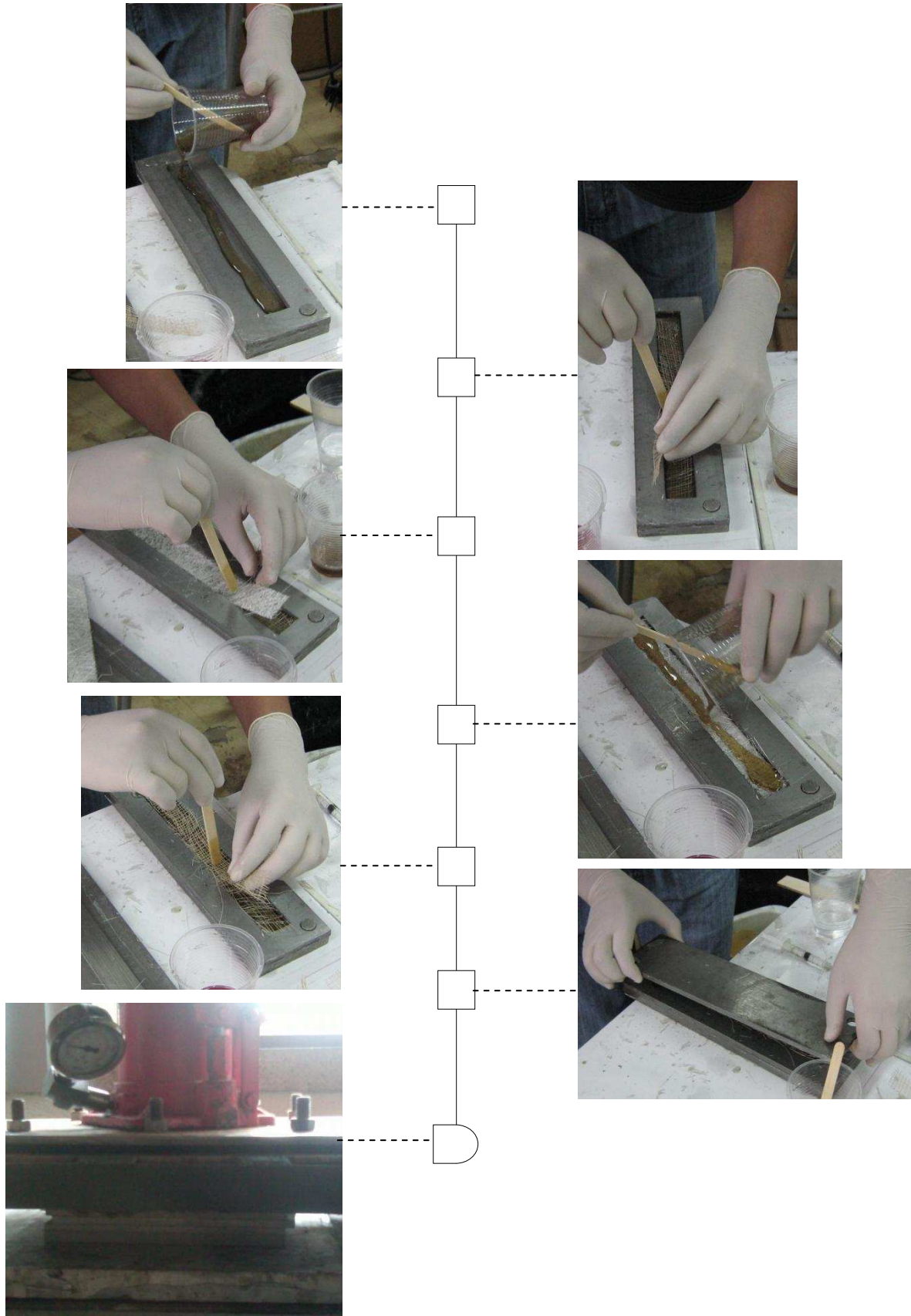
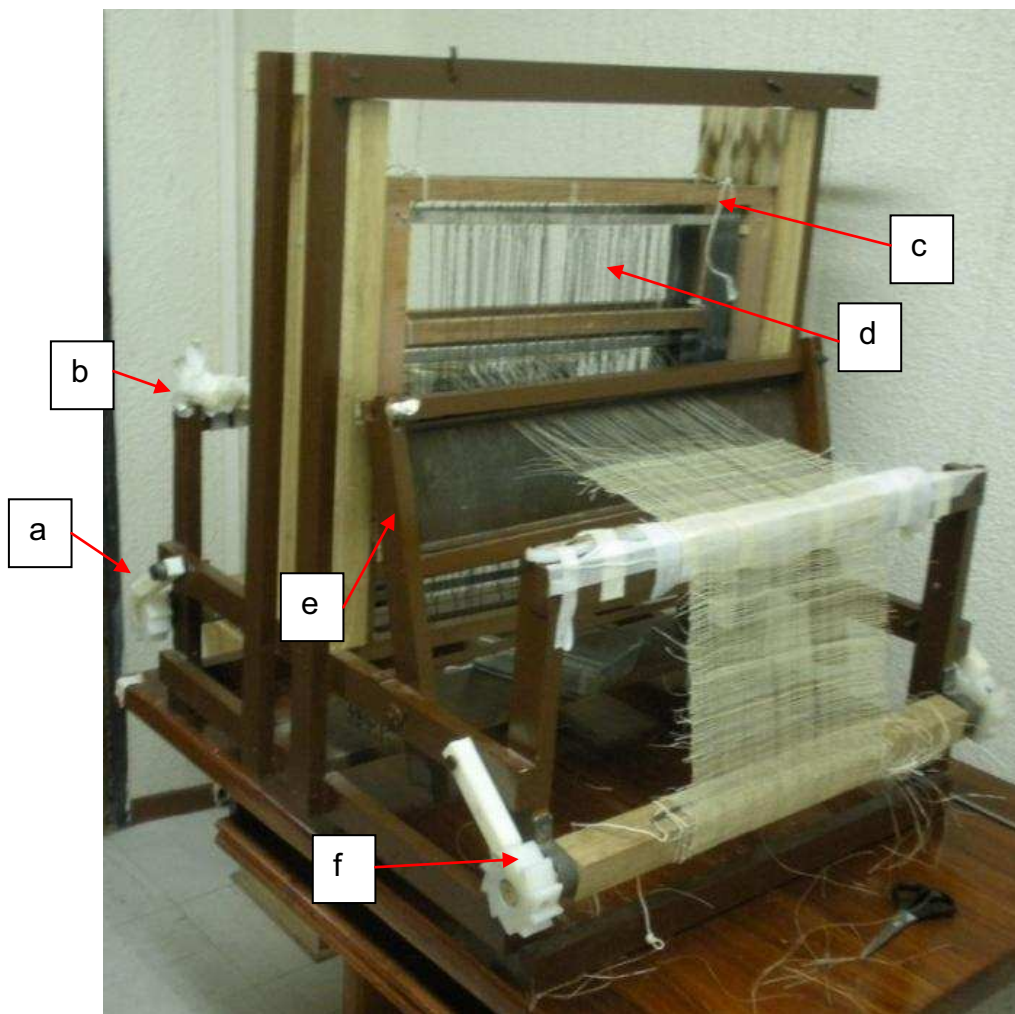


Figura A1. Diagrama de procesos de la fabricación de probetas de material compuesto híbrido.

ANEXO 4. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS TEJIDOS PLANO Y SARGA

En este trabajo se elaboraron tejidos entrelazando dos conjuntos de hilos dispuestos en ángulo recto (tejido plano) y a 45° (tejido sarga). Los hilos longitudinales se llaman urdimbre y los hilos transversales se denominan trama. La separación entre las fibras de trama y urdimbre es de aproximadamente 2 mm. Las partes del telar usado se muestran en la figura A2. Dicho telar dispone de cuatro lizos, los cuales determinan la complejidad del diseño del tejido.



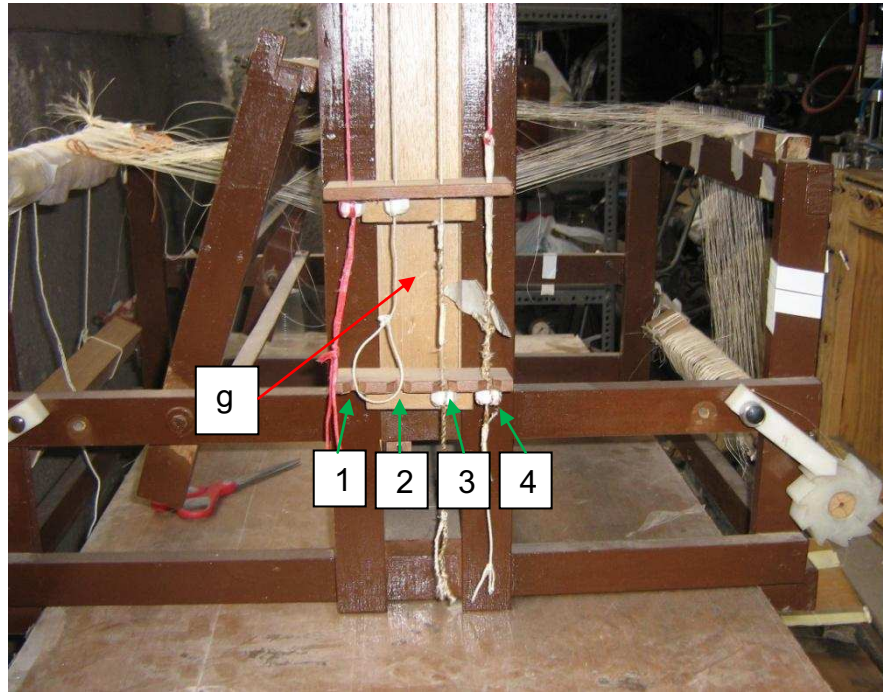


Figura A2. Partes del telar manual. (a) Árbol de urdimbre. (b) Guía de hilos. (c) Lizos. (d) Mallas. (e) Peine. (f) Árbol de tejido. (g) Caladoras.

- Para la elaboración de los tejidos se siguió el proceso que se describe a continuación: [Maldonado y Paredes, 2010]
- Escoger las fibras de mayor longitud y diámetro. Posteriormente estas fibras se usarán para la urdimbre.
- Formar grupos de 10 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 urdimbre. Este árbol es rotativo y por tanto se debe asegurar los extremos haciendo coincidir los trinquetes en los extremos.
- Pasar los hilos por la guía de hilos y atravesarlos por los ojos de las mallas, alternando entre cada lizo como se muestra en la figura A3.



Figura A3. Colocación de las fibras en las mallas de cada lizo.

- Tensar las fibras y envolver en el árbol de urdimbre.
- Asegurar las fibras también en el árbol de tejido, como se muestra en la figura A4.



Figura A4. Colocación de 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. Cambiar de posición a las caladoras para realizar los distintos tipos de tejido. El orden de calado para el tejido plano fue de 1 y 4 arriba 2 y 3

abajo luego 1 y 4 abajo 2 y 3 arriba. Para el tejido sarga el calado fue 1 y 2 arriba 3 y 4 abajo luego, 2 y 3 arriba 1 y 4 abajo, 1 y 2 abajo y 3 y 4 arriba. En la figura A2 se puede notar la numeración de las caladoras.

- Recoger el tejido terminado en el árbol de tejido.
- En caso de rotura de una fibra, se debe realizar el nudo del tejedor.

ANEXO 5. MANEJO DEL PROGRAMA STATGRAPHICS Plus 5.1.

Para el análisis estadístico de las propiedades mecánicas calculadas de los datos de los ensayos, se siguió el siguiente procedimiento:

- Una vez abierto el programa dirigirse en la barra de herramientas superior a la opción avanzado luego a diseño experimental y finalmente a crear diseño.
- Seleccionar la opción factor categórico individual.
- Ingresar el nombre de la configuración a analizar y el número de formulaciones que se van a comparar (ver figura A5).

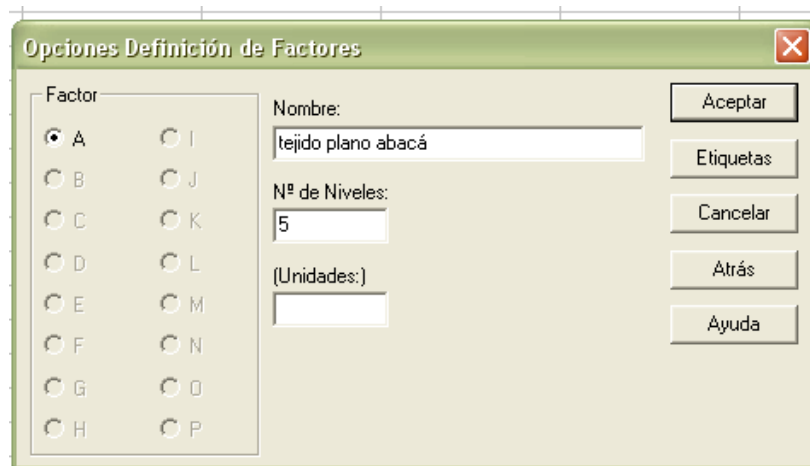


Figura A5. Opciones de definición de factores.

- Ingresar el nombre de la propiedad a analizar y sus respectivas unidades (ver figura A6).

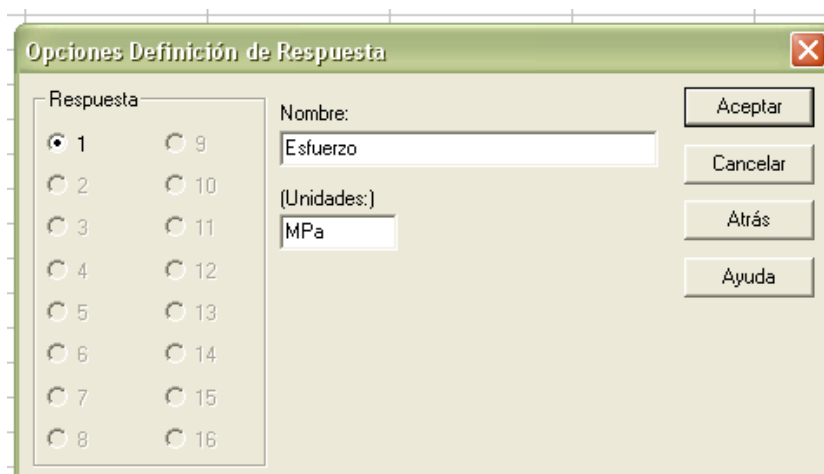


Figura A6. Opciones de definición de respuesta.

- En el recuadro diseños duplicados colocar el tamaño de la muestra menos uno; además, desactivar la opción aleatorizar. (ver figura A7)

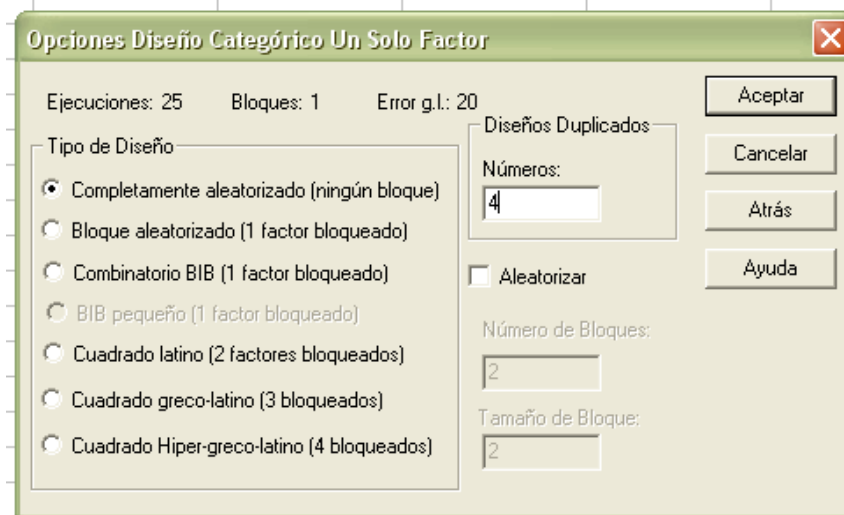


Figura A7. Opciones de diseño categórico un solo factor.

- Ingresar los datos de la propiedad a analizar. Volver a la opción avanzado diseño experimental analizar diseño. (ver figura A8)

	BLOQUE	F corta fibra de	Esfuerzo	Col_4	Col_5	Col_6	Col_7	Col_8	Col_9
1	1	1	113,7559697						
2	1	1	85,42366297						
3	1	1	73,67650545						
4	1	1	80,40217419						
5	1	1	81,84759747						
6	1	2	19,4121402						
7	1	2	27,40075069						
8	1	2	25,00716064						
9	1	2	26,36097738						
10	1	2	26,36097738						
11	1	3	75,71194608						
12	1	3	80,90136267						
13	1	3	71,42975852						
14	1	3	60,38396816						
15	1	3	60,45439889						
16	1	4	49,1604132						
17	1	4	55,93653197						
18	1	4	55,9657589						
19	1	4	56,39553754						
20	1	4	54,33741215						
21	1	5	30,16159484						
22	1	5	29,33533316						
23	1	5	40,14882552						
24	1	5	33,24532611						
25	1	5	30,91194281						
26									
27									

Figura A8. Ingreso de datos de propiedades a analizar y análisis del diseño experimental.

- En las opciones que presenta el programa se puede seleccionar los gráficos que se desean ver, así como también las tablas con los resúmenes de los métodos estadísticos que ofrece el programa. Con estos elementos se puede efectuar el análisis de las propiedades entre grupos de formulaciones. (ver figura A9)

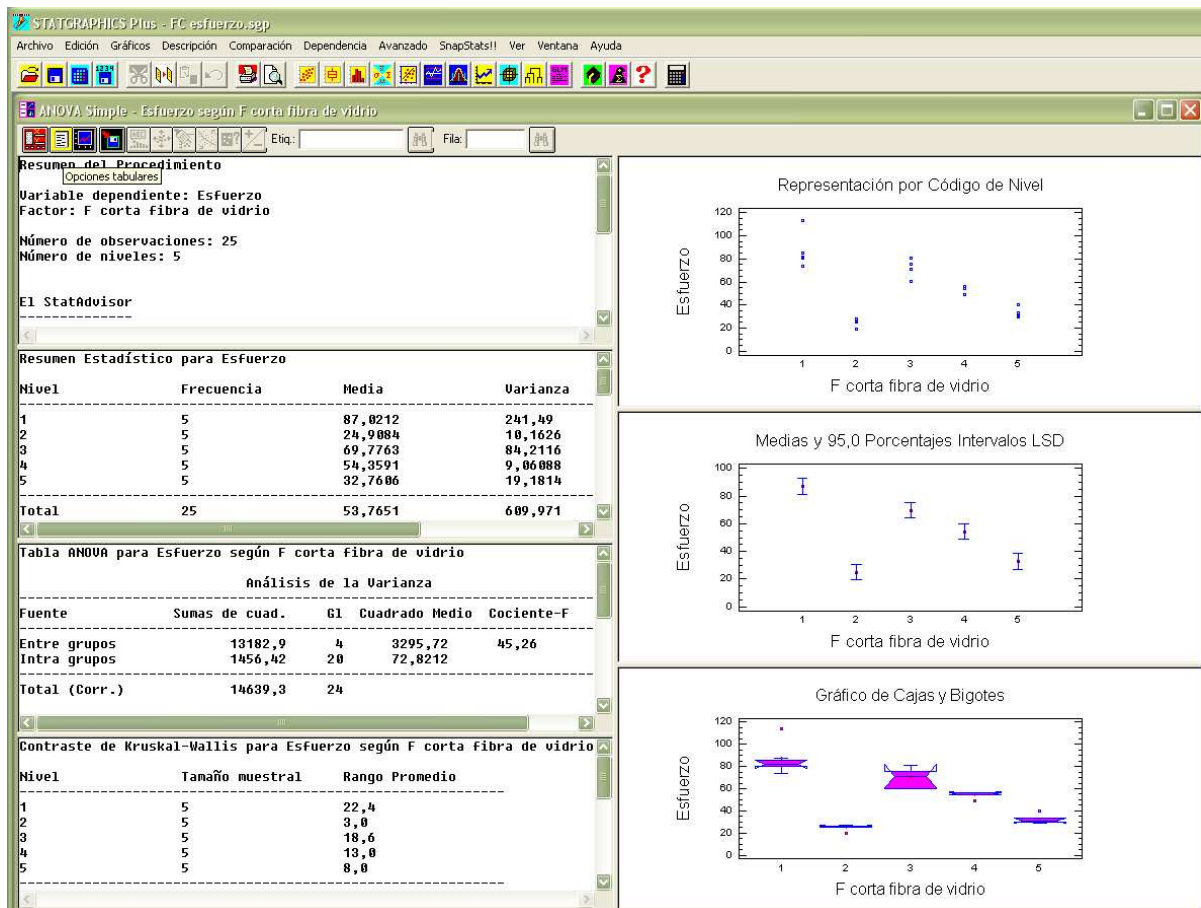


Figura A9. Opciones de gráficos y tablas usadas en el análisis estadístico.

ANEXO 6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

Los ensayos de impacto realizados tienen el mismo formato propuesto en la norma ASTM D 5628. Las abreviaturas que aparecen en los recuadros tienen el siguiente significado:

h_o : Altura mínima en la cual ocurre la primera falla.

d_h : Variación de altura.

h : Altura media de impacto para producir la falla.

m : Masa del dardo.

s_h : Desviación estándar.

S_h : Desviación estándar de la altura de impacto.

E : Energía absorbida por la probeta.

N_o : Número de probetas que no fallaron.

$N_g = N$: Número de probetas que fallaron.

A : Sumatoria del número de fallas por la posición de falla.

B : Sumatoria del número de fallas por la posición de falla al cuadrado.

S_{mfe} : Desviación estándar de la energía de falla.

Tabla A3. Resistencia al impacto del material compuesto híbrido reforzado con mat de fibra unidireccional orientada longitudinalmente de abacá y fibra de vidrio de matriz poliéster.

RESULTADOS DEL ENSAYO								
FIBRA CONTINUA ABACÁ/FIBRA DE VIDRIO								
X=FALLA					O=NO FALLA			
h(cm)	11,5	11	10,5	10	9,5	9		
1	X							
2		X						
3			X					
4				X				
5					X			
6						O		
7					O			
8				X				
9					O			
10				X				
11					X			
12						O		
13					O			
14				X				
15					X			
16						O		
17					X			
18						O		
19					X			
20						O		
							TOTALES	
nx	1	1	1	4	5	0	12	Ng
no	0	0	0	0	3	5	8	No
i	4	3	2	1	0			
ni	1	1	1	4	5		12	N
in1	4	3	2	4	0		13	A
i^2n1	16	9	4	4	0		33	B

$$d_h = 5\text{mm} \quad h_o = 95\text{mm} \quad m = 0.4998\text{kg}$$

$$h = h_o + d_h \left(\frac{A}{N} \pm 0.5 \right) \rightarrow h = 100.416 \pm 2.5 \text{ mm}$$

$$s_h = 1.62d_h \left[\frac{B}{N} - \left(\frac{A}{N} \right)^2 \right] + 0.047d_h \rightarrow s_h = 13.003 \text{ mm}$$

$\frac{s}{d}$ no fue posible calcular

$$E = mgh \rightarrow E = 0.492 \text{ J}$$

Tabla A4. Resistencia al impacto del material compuesto híbrido reforzado con mat de fibra de vidrio de matriz poliéster.

RESULTADOS DEL ENSAYO						
FIBRA DE VIDRIO						
X=FALLA			O=NO FALLA			
h(cm)	11	10,5	10	9,5		
1	X					
2		X				
3			O			
4		X				
5			X			
6				O		
7			X			
8				O		
9			O			
10		X				
11			O			
12		X				
13			X			
14				O		
15			O			
16		X				
17			X			
18				O		
19			O			
20		X			TOTALES	
nx	1	6	4	0	11	Ng
no	0	0	5	4	9	No
i	2	1	0			
ni	1	6	4		11	N
in1	2	6	0		88	A
i^2n1	4	6	0		10	B

$$d_h = 5mm, \quad h_o = 100mm, \quad m = 0.4998kg$$

$$h = h_o + d_h \left(\frac{A}{N} \pm 0.5 \right) \rightarrow h = 103.63 \pm 2.5 mm$$

$$s_h = 1.62d_h \left[\frac{B}{N} - \left(\frac{A}{N} \right)^2 \right] + 0.047d_h \rightarrow s_h = 3.314 mm$$

$$\frac{s}{d} = 0.662 \rightarrow G = 1.07$$

$$S_h = \frac{G \cdot s_h}{\sqrt{N}} \rightarrow S_h = 1.069 mm$$

$$E = mgh \rightarrow E = 0.508 J$$

$$S_{mfe} = s_h \cdot w \cdot f \rightarrow S_{mfe} = 0.01624 J$$

Tabla A5. Resistencia al impacto del material compuesto híbrido reforzado con mat de fibra de vidrio de matriz poliéster.

RESULTADOS DEL ENSAYO											
FIBRA DE VIDRIO											
X=FALLA						O=NO FALLA					
h(cm)	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8		
1					X						
2						X					
3							X				
4								X			
5									O		
6								O			
7							X				
8								O			
9							O				
10						X					
11							O				
12						O					
13					O						
14				O							
15			O								
16		O									
17	X										
18		O									
19	X										
20		X								TOTALES	
nx	2	1	0	0	1	2	2	1	0	9	Ng
no	0	2	1	1	1	1	2	2	1	11	No
i	7	6	5	4	3	2	1	0			
ni	2	1	0	0	1	2	2	1		9	N
in1	14	6	0	0	3	4	2	0		29	A
i^2n1	98	36	0	0	9	8	2	0		153	B

$$d_h = 5mm \quad h_o = 85mm \quad m = 0.0706kg$$

$$h = h_o + d_h \left(\frac{A}{N} \pm 0.5 \right) \rightarrow h = 101 \pm 2.5 mm$$

$$s_h = 1.62d_h \left[\frac{B}{N} - \left(\frac{A}{N} \right)^2 \right] + 0.047d_h \rightarrow s_h = 54 mm$$

$\frac{s}{d}$ no fue posible calcular

$$E = mgh \rightarrow E = 0.07 J$$