

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIPROPILENO
REFORZADAS CON FIBRAS DE VIDRIO Y ABACÁ MEDIANTE
MOLDEO POR COMPRESIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

JORGE PATRICIO CEVALLOS ESPINOSA

george_pce@hotmail.com

JOSÉ GABRIEL TENESACA BRAVO

jose.tbravo@gmail.com

DIRECTOR: VÍCTOR GUERRERO, Ph.D.

victor.guerrero@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2012

DECLARACIÓN

Nosotros, Jorge Patricio Cevallos Espinosa y José Gabriel Tenesaca Bravo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los 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 normativa institucional vigente.

Jorge Patricio Cevallos Espinosa

José Gabriel Tenesaca Bravo

CERTIFICACIÓN

Certifico que bajo mi supervisión, el presente proyecto de titulación fue desarrollado en su totalidad por los señores: Jorge Patricio Cevallos Espinosa y José Gabriel Tenesaca Bravo.

Víctor Guerrero, Ph.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto de titulación es un esfuerzo en el que directa o indirectamente participaron varias personas, aportando con su valiosa opinión, corrección, paciencia, ánimo y colaboración económica para lograr culminarlo con éxito.

Agradecemos a Dios por darnos sabiduría, salud y bendiciones diarias en la culminación de un peldaño más en nuestras vidas.

Agradecemos al Dr. Víctor Guerrero por su orientación y dirección acertada en la ejecución de este proyecto ha permitido que concluyamos satisfactoriamente con nuestros estudios superiores.

Gracias a nuestros queridos padres: Inés Espinosa Herrera (Jorge); Elena Bravo, Hernán Tenesaca y en especial a Zoila Bravo (Gabriel), por su amor y apoyo incondicional brindado en el transcurso de nuestra carrera, gracias también por su paciencia, comprensión y sabios consejos que nos han permitido alcanzar nuestras metas.

Gracias a las personas que trabajan en el LANUM: Ing. Carla Valdivieso, Ing. Salomé Gáelas, Ing. Emilio Cedeño, Ing. José Luis Dávila, Ing. Nelly Rosas, Ing. Patricia Rodríguez e Ing. Patricia Pontón por su constante apoyo y su especial colaboración en la corrección de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres, Elena Bravo y Hernán Tenesaca, por su apoyo, guía, sacrificio y amor incondicional a lo largo de toda mi carrera, ya que gracias a su ejemplo de dedicación y entrega se ha logrado conseguir el objetivo de concluir con éxito nuestra etapa de estudios universitarios.

José.

A mi madre, Inés Espinosa Herrera, por ser la persona más importante en mi vida y un ejemplo a seguir, por el amor, sacrificio y apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida y de mi carrera profesional. A ella que me ha enseñado que la satisfacción se encuentra en mis propios progresos y no en las apreciaciones de los demás.

Jorge.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	IV
CONTENIDO	V
CONTENIDO DE FIGURAS	XI
CONTENIDO DE TABLAS.....	XV
RESUMEN	XX
1. CAPÍTULO 1	
MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.....	1
1.1. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA.....	1
1.1.1. CLASIFICACIÓN	4
1.1.2. DEFINICIÓN.....	5
1.1.3. POLIPROPILENO.....	10
1.1.3.1. Propiedades	14
1.1.3.2. Aplicaciones	18
1.1.3.3. Tipos básicos de polipropileno	19
1.1.3.4. Estructura.....	20
1.1.4. MATERIALES DE REFUERZO	22
1.1.4.1. REFUERZO DE FIBRAS NATURALES.....	23
1.1.4.2. FIBRA DE ABACÁ	25
1.1.4.3. FIBRA DE VIDRIO [14].....	29
1.1.4.4. INTERFAZ FIBRA-MATRIZ	35

1.2. COMPUESTOS HÍBRIDOS.....	37
1.2.1. DEFINICIÓN, PROPIEDADES Y APLICACIONES.....	37
1.2.2. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO	39
1.2.2.1. PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS	39
1.2.2.2. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS COMERCIALES	40
1.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS HÍBRIDOS.....	44
1.3.1. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	44
1.3.2. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO.....	45
1.3.3. EVALUACIÓN FÍSICA Y ESTRUCTURAL.....	45
1.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS EN LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.....	46
1.3.5. RESULTADOS OBTENIDOS DE COMPUESTOS HÍBRIDO EN TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN	48
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	51
1.5. OBJETIVOS.....	52
1.6. ALCANCE	53
2. CAPÍTULO 2	
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	55
2.1. MATERIALES, EQUIPOS Y TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO.....	55
2.1.1. MATERIALES	55
2.1.1.1. Matriz polipropileno	55
2.1.1.2. Fibra de vidrio	56
2.1.1.3. Fibra de abacá.....	57
2.1.2. EQUIPOS	58
2.1.3. ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	62
2.2. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ.....	64
2.2.1. PRUEBAS PRELIMINARES PARA ESTABLECER EL DESEMPEÑO DEL MOLDE	64
2.2.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	64

2.2.2.1.	Preparación de fibras de abacá.....	65
2.2.2.2.	Preparación de fibras de vidrio.....	67
2.2.2.3.	Determinación de las características de los pellets de polipropileno.....	68
2.3.	MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	69
2.3.1.	DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MOLDEO POR COMPRESIÓN	70
2.3.2.	CONFORMACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ.....	71
2.3.3.	CONFORMACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO.....	73
2.3.4.	ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO	73
2.4.	OBTENCIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE LAS LÁMINAS MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	77
2.4.1.	PROBETAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN	77
2.4.2.	PROBETAS PARA ENSAYOS EN FLEXIÓN	78
2.4.3.	PROBETAS PARA ENSAYOS EN IMPACTO	79
2.5.	CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO 81	
2.5.1.	ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	81
2.5.2.	ENSAYOS DE FLEXIÓN	82
2.5.3.	ENSAYOS DE IMPACTO	83
2.5.4.	DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS.....	84
2.6.	MÉTODOS Y HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
2.7.	SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO CON EL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	87
2.7.1.	MÉTODOS DE SELECCIÓN DEL PROTOTIPO	87
2.7.2.	METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO	88
2.8.	CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO	92
2.8.1.	METODOLOGÍA PARA ENSAYAR EL PROTOTIPO.....	92
2.8.2.	MÉTODO DE ENSAYO ALTERNO	96

3. CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
3.1. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ	98
3.1.1. DESEMPEÑO DEL MOLDE	98
3.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PREPARACIÓN DE LA FIBRA DE ABACÁ	101
3.2. ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN	105
3.3. CONFORMACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ.....	109
3.4. ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO	112
3.4.1. PROBETAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN	115
3.4.2. PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN	116
3.4.3. PROBETAS PARA ENSAYOS DE IMPACTO.....	118
3.5. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	119
3.5.1. ENSAYO DE TRACCIÓN.....	121
3.5.2. ENSAYO DE FLEXIÓN.....	127
3.5.3. ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO.....	132
3.6. DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS.....	135
3.7. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO ABACÁ/VIDRIO/POLIPROPILENO FRENTE A OTROS MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS	136
3.7.1. Compuestos de matriz PLA reforzados con fibra de abacá	142
3.7.2. Compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya.....	143
3.7.3. Compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión	145

3.7.4.	Compuestos de poliéster reforzados con fibras de abacá	146
3.7.5.	Comparación de propiedades de diferentes compuestos híbridos reforzados con fibras naturales	148
3.8.	ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO	156
3.8.1.	SELECCIÓN DEL PROTOTIPO	156
3.8.2.	ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO	160
3.8.3.	ESTIMACIÓN DEL COSTO DE LA CANILLERA DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	163
3.9.	CARACTERIZACION DEL PROTOTIPO	166
4.	CAPÍTULO 4	
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	173
4.1.	CONCLUSIONES	173
4.2.	RECOMENDACIONES	177
	BIBLIOGRAFÍA	178
	ANEXOS	182
ANEXO 1.	FICHA TÉCNICA DEL POLIPROPILENO.....	183
ANEXO 2.	PLANOS DEL MOLDE PARA LA ELABORACIÓN DE LÁMINAS.....	184
ANEXO 3.	PLANOS DEL MOLDE DE TERMOFORMADO PARA EL PROTOTIPO.....	185
ANEXO 4.	CÁLCULOS DE MASA DE FIBRA DE VIDRIO, ABACÁ Y PP PARA FORMAR LOS COMPUESTOS.....	186
ANEXO 5.	CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN.....	188
ANEXO 6.	CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN.....	189

ANEXO 7.	CÁLCULO DE DENSIDAD REAL DEL COMPUESTO HÍBRIDO.....	190
ANEXO 8.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	191
ANEXO 9.	MICROGRAFÍA DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO.....	206

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1. Sectores de aplicación más comunes de los materiales compuestos termoplásticos (Biron, 2007).	3
Figura 1.2. Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo. (Calister, 2007).....	4
Figura 1.3. Clasificación de los materiales híbridos. (Ashby, 2011).....	5
Figura 1.4. Configuración básica de un material compuesto tipo sánduche mostrando panel completo (A), láminas de matriz (B) y núcleo de refuerzo (C).	6
Figura 1.5. Elementos característicos de los materiales compuestos.	7
Figura 1.6. Monómero de polipropileno.	10
Figura 1.7. Molécula de polímero PP en formas: (a) isotáctico, (b) sindiotáctico y (c) atáctico.....	11
Figura 1.8. Dureza con indentador de bola del PP como una función de la temperatura (°C).....	17
Figura 1.9. Estructura de moléculas de PP copolimerizado con distribución aleatoria y en bloque. P y E representan las unidades monoméricas polipropileno y etileno respectivamente.....	20
Figura 1.10. Curva tracción vs deformación de un material compuesto con fibras continuas (línea gruesa), mostrando cómo se relaciona con las curvas de las fibras y de la matriz (líneas finas).	22
Figura 1.11. Planta de abacá. (André, A., 2006)	26
Figura 1.12. Exportaciones de abacá. (Banco Central del Ecuador)	29
Figura 1.13. Esquema del procedimiento convencional de fabricación de fibra de vidrio.	31
Figura 1.14. Fibras de vidrio siendo extraídas de los agujeros en un buje. (Owen-Corning, Inc.).....	31
Figura 1.15. Presentaciones más usuales de la fibra de vidrio: (a) fibra continua y mechada; (b) fibras cortadas; (c) mat de fibra de vidrio.	35
Figura 1.16. Unión mecánica formada cuando un polímero líquido moja una superficie sólida rugosa. (Hull, 2003).....	36
Figura 1.17. Secuencia típica de termoformado. (Campbell, 2004).....	41
Figura 1.18. Fabricación automática de partes GMT. (Campbell, 2004)	42
Figura 2.1. Polipropileno PP-PH1310 Petroquim.....	56
Figura 2.2. Fibra de vidrio en forma de mat.	57
Figura 2.3. Fibra de abacá cortada a 10 mm.	57
Figura 2.4. Instrumentos de medición: (a) micrómetro, (b) medidor de espesores, (c) calibrador pie de rey.	62
Figura 2.5. Diagrama de flujo de la estrategia metodológica seguida en el proyecto de titulación.	63
Figura 2.6. Preparación de la fibra corta de abacá de 10 mm. a) Corte de la fibra a 500 mm, b) Selección y corte de fibra a 10 mm y c) Tamizado de la fibra.	65
Figura 2.7. Preparación de la fibra continua de abacá de 250 mm: (a) corte de un mechón de la fibra de 300 mm, (b) lavado y remoción de pilosidades, (c) ajuste de los extremos del mechón luego del lavado, (d) mechones de abacá en el interior de la estufa para su posterior secado.	67

Figura 2.8. Cortes en la fibra de vidrio: (a) trazado en la fibra de vidrio de acuerdo a las dimensiones del molde, (b) corte de láminas de fibra de vidrio, (c) extracción del exceso.....	68
Figura 2.9. Pellets de polipropileno en el analizador de humedad.	69
Figura 2.10. Método de procesamiento del material para la obtención de láminas de polipropileno: (a) distribución de los pellets en el molde; (b) temperatura de la prensa; (c) control de la temperatura en el macho del molde.	70
Figura 2.11. Elaboración de material compuesto conformación tipo sánduche utilizando fibra de abacá de 20 mm.....	72
Figura 2.12. Colocación de fibra de abacá en el molde: (a) Distribución de fibra corta; (b) Distribución de fibra continúa.	72
Figura 2.13. Configuración en capas de matriz y refuerzo dentro del molde.	73
Figura 2.14. Preparación del material compuesto híbrido tipo sánduche.	74
Figura 2.15. Colocación de capas de matriz y refuerzo híbrido para probetas de flexión e impacto.	74
Figura 2.16. Fibra corta de abacá compactada en el molde.....	75
Figura 2.17. Configuraciones de refuerzos empleados para elaborar probetas de material compuesto híbrido.	76
Figura 2.18. Corte de probetas: (a) sierra de diente fino; (b) probetas cortadas.....	78
Figura 2.19. Lijado de probetas de tracción con lija # 240.	78
Figura 2.20. Preparación de probetas para ensayo de flexión: (a) corte; (b) probetas cortadas; (c) lijado de probetas.....	79
Figura 2.21. Preparación de probetas de impacto: (a) corte con sierra de diente fino; (b) probetas cortadas; (c) lijado de probetas	80
Figura 2.22. Montaje del extensómetro.....	81
Figura 2.23. Montaje del ensayo de flexión: (a) montaje de dado para flexión a tres puntos; (b) probeta ubicada para empezar el ensayo de flexión; (c) desplazamiento del punzón al finalizar el ensayo.	83
Figura 2.24. Ensayo de impacto: (a) máquina de impacto con su set de pesos; (b) ubicación de la probeta en la entenalla.	84
Figura 2.25. Curva esfuerzo vs. deformación de un material compuesto en el que se indica la pendiente de la curva.	86
Figura 2.26. Propuestas de prototipos: (a) canillera; (b) manoplas de entrenamiento; (c) jabonera.....	88
Figura 2.27. Proceso requerido para la obtención de productos de material compuesto híbrido y de polipropileno.	89
Figura 2.28. Zonas de impacto en la canillera.	93
Figura 3.1. Fugas de PP por las uniones del molde.	99
Figura 3.2. Material compuesto reforzado con fibra de abacá: (a) Burbujas internas alrededor de las fibras y (b) Fibra expuesta – defecto superficial.....	101

Figura 3.3. Comparación física de la fibra de abacá después del secado ensayos A, B y D (fibra sin secar).	103
Figura 3.4. Comparación física de la fibra de abacá después del secado (ensayo C) y la fibra sin secar.....	103
Figura 3.5. Lámina de PP con defectos de burbujas internas y líneas producidas por el flujo del material.	104
Figura 3.6. Ensayo realizado en el analizador de humedad a los pellets sin secar.....	104
Figura 3.7. Láminas de matriz polipropileno degradada y no degradada a una presión de 23 psi. a) Tiempo de exposición a la temperatura 5 min; b) Tiempo de exposición a la temperatura 35 min (material degradado).	107
Figura 3.8. Diagrama de las fases de moldeo por compresión.....	109
Figura 3.9. Lámina de material compuesto libre de defectos.	109
Figura 3.10. Lámina de material híbrido reforzado con 25 vol% de fibras (50% vidrio y 50% abacá).....	114
Figura 3.11. Probeta para ensayo de tracción con fibra longitudinal orientada unidireccionalmente al 20 vol% de refuerzo (75% abacá / 25% fibra de vidrio).....	115
Figura 3.12. Probeta para ensayo de tracción al 20 vol% de refuerzo con fibra corta de abacá de 20 mm y 25% de fibra de vidrio.....	116
Figura 3.13. Probeta para ensayo de flexión al 25 vol% de refuerzo con fibra corta de abacá de 20 mm y 25% fibra de vidrio.....	117
Figura 3.14. Probeta para ensayo de flexión al 25 vol% de refuerzo híbrido de 50% de fibra de abacá longitudinal unidireccional y 50% fibra de vidrio.	118
Figura 3.15. Probeta de impacto al 20 vol% de refuerzo de fibra de abacá longitudinal unidireccional (25% fibra de vidrio / 75% abacá).....	118
Figura 3.16. Probeta de impacto al 25 vol% de refuerzo de fibra corta de abacá de 20 mm (50% abacá / 50% fibra de vidrio).	119
Figura 3.17. Gráfico esfuerzo vs deformación de materiales compuestos híbridos al 25% de refuerzo y matriz de polipropileno.	122
Figura 3.18. Fracturas presentadas en los ensayos de tracción para la fibra continua unidireccional abacá 20 vol%	124
Figura 3.19. Fracturas presentadas en los ensayos de tracción para la fibra continua unidireccional 25 vol% de refuerzo (50% abacá / 50% fibra de vidrio)	125
Figura 3.20. Fracturas presentadas en los ensayos de tracción para la fibra de vidrio al 25 vol% como único refuerzo.	125
Figura 3.21. Gráfico esfuerzo vs deformación a flexión de materiales compuestos híbridos fibra de abacá-fibra de vidrio y matriz de polipropileno.	128
Figura 3.22. (a) fibra longitudinal unidireccional de abacá al 25 vol% de refuerzo, (b) fibra corta de abacá al 20 vol% de refuerzo (25% fibra de vidrio/75% abacá), (c) fibra longitudinal unidireccional al 25 vol% de refuerzo (25% abacá/75% fibra de vidrio).....	130

Figura 3.23. Tipos de falla en probetas de impacto de materiales compuestos híbridos: (a) matriz de polipropileno, (b) fibra corta de abacá al 20 vol%, (c) fibra longitudinal unidireccional de abacá al 20 vol% (50% abacá / 50% fibra de vidrio).....	134
Figura 3.24. Resistencia específica vs. módulo específico en tracción de las 27 configuraciones en estudio y materiales de referencia.....	140
Figura 3.25. Resistencia específica vs. módulo específico en flexión de las 27 configuraciones en estudio.	141
Figura 3.26. Gráfico radial de materiales compuestos PLA/abacá frente a los compuestos híbridos en estudio.	143
Figura 3.27. Gráfico radial del material compuesto resina poliéster/cabuya frente a compuestos híbridos en estudio.	144
Figura 3.28. Gráfico radial de materiales compuestos PP/abacá frente a compuestos híbridos PP/abacá/fibra de vidrio en estudio.	146
Figura 3.29. Diagrama de comparación de propiedades mecánicas de compuestos poliéster/abacá frente a materiales compuestos híbridos elaborados en el presente proyecto.	147
Figura 3.30. Comparación de la resistencia máxima a tracción y flexión del compuesto abacá/vidrio/PP frente a diferentes compuestos híbridos.	149
Figura 3.31. Comparación de la resistencia máxima a tracción y flexión del compuesto abacá/vidrio/PP frente a diferentes compuestos híbridos.	150
Figura 3.32. Propiedades mecánicas de compuestos híbridos reforzados con fibras naturales.....	151
Figura 3.33. Resistencia específica vs. módulo específico a tracción de compuestos híbridos de matriz polipropileno.	153
Figura 3.34. Curvas esfuerzo vs. deformación unitaria de diferentes materiales.	154
Figura 3.35. Módulo de tenacidad vs. módulo de resiliencia de diferentes materiales.....	155
Figura 3.36. Diagrama de flujo del proceso de producción del prototipo.....	162
Figura 3.37. Canillera modelo ensayada.....	168
Figura 3.38. Canilleras de material compuesto híbrido ensayadas: (a) fibra continua abacá al 20 vol% de refuerzo (75% abacá / 25% vidrio); (b) fibra corta de abacá al 25 vol% de refuerzo (25% abacá / 75% vidrio).....	169

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1. Marcas registradas, características y aplicaciones típicas de polímeros termoplásticos.	8
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas de los termoplásticos de mayor uso comercial. [6]	12
Tabla 1.3. Comparación del PP no modificado con otros materiales: desventajas. [6]	13
Tabla 1.4. Cuadro comparativo entre ventajas/desventajas de otros termoplásticos respecto al PP. [7]	14
Tabla 1.5. Propiedades físicas del PP.....	15
Tabla 1.6. Aplicaciones del PP.	18
Tabla 1.7. Requerimientos para aplicaciones, donde el PP es una de las mejores opciones como material. ³	18
Tabla 1.8. Propiedades de los polipropilenos homopolímeros Braskem PP H301 y Petroquim PP – PH1310. Fuente IDES	21
Tabla 1.9. Propiedades mecánicas de las fibras naturales. (Nabi Saheb, 1999).....	24
Tabla 1.10. Propiedades mecánicas de la fibra de abacá calidad 3.....	27
Tabla 1.11. Propiedades de la fibra de abacá calidad 3 de acuerdo a estudios realizados en la EPN ⁵	27
Tabla 1.12. Exportaciones de abacá. (Banco Central del Ecuador)	28
Tabla 1.13. Composición química de algunas fibras de vidrio comunes. (Chawla, 1998)	32
Tabla 1.14. Propiedades mecánicas de algunas fibras de vidrio. (Chawla, 1998)	33
Tabla 1.15. Propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio en distintas configuraciones y cantidades. [Hollaway, 1994].....	34
Tabla 2.1. Propiedades de polipropileno.....	56
Tabla 2.2. Características del equipo utilizado.	58
Tabla 2.3. Pruebas preliminares de presión de moldeo del PP.	64
Tabla 2.4. Valores de temperatura y tiempo de secado para la fibra corta de abacá de 10 y 20 mm.	66
Tabla 2.5. Valores de temperatura y tiempo de secado para el polipropileno	69
Tabla 2.6. Dimensiones y tolerancias de las probetas de tracción.....	77
Tabla 2.7. Dimensiones y tolerancias de las probetas de flexión.....	78
Tabla 2.8. Dimensiones y tolerancias de las probetas de impacto.....	80
Tabla 2.9. Condiciones de ensayo de tracción para la máquina universal de ensayos. (Ponce, 2011)	82
Tabla 2.10. Condiciones de ensayo de flexión para la máquina universal de ensayos. (Ponce, 2011)	82
Tabla 2.11. Prueba de temperaturas y tiempos para elaborar el prototipo.	90
Tabla 2.12. Descripción del proceso para elaboración del prototipo.....	90
Tabla 2.13. Velocidades y alturas de impacto.	93
Tabla 2.14. Ensayos de prototipo de acuerdo a norma NOCSAE DOC (ND) 090 –06m07.	94
Tabla 2.15. Alturas de impacto para ensayar el prototipo.	94
Tabla 2.16. Comparación de ensayos a diferentes alturas.	95
Tabla 2.17. Ensayo alternativo con esfera de acero.....	96
Tabla 3.1. Porcentaje de pérdidas en peso de PP en función de la presión de moldeo.	99
Tabla 3.2. Condiciones de pruebas preliminares para determinación del desempeño del molde.	100

Tabla 3.3. Porcentaje de humedad de la fibra de abacá.	102
Tabla 3.4. Láminas de matriz polipropileno procesadas a diferentes valores de presión.....	106
Tabla 3.5. Láminas obtenidas de la matriz de polipropileno después de aplicar los diferentes procesos de enfriamiento.	107
Tabla 3.6. Parámetros de moldeo por compresión para obtener láminas de PP.....	109
Tabla 3.7. Pérdida excesiva de matriz en el material compuesto quedando desprotegida la fibra.....	110
Tabla 3.8. Degradación de la fibra en el material compuesto debido a la elevada temperatura.	111
Tabla 3.9. Material compuesto reforzado con fibras de abacá libre de defectos.	111
Tabla 3.10. Otros defectos y parámetros bajo los cuales se presentaron.....	112
Tabla 3.11. Parámetros de secado de las fibras de abacá.....	113
Tabla 3.12. Parámetros y defectos en el material compuesto híbrido refuerzo 50V/50A.	113
Tabla 3.13. Comparación de dos láminas de material compuesto híbrido a diferentes fracciones volumétricas.....	114
Tabla 3.14. Códigos asignados a las 27 configuraciones diferentes de material compuesto.....	120
Tabla 3.15. Cuadro comparativo de los resultados de esfuerzo máximo registrados en los ensayos de tracción.	121
Tabla 3.16. Cuadro comparativo de los resultados de módulos de elasticidad registrados en los ensayos de tracción.	123
Tabla 3.17. Cuadro comparativo de los resultados de las deformaciones unitarias registradas en los ensayos de tracción.	123
Tabla 3.18. Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas a tracción de la matriz de PP y de varias configuraciones de material compuesto híbrido.	126
Tabla 3.19. Cuadro comparativo de los esfuerzos máximos registrados en los ensayos de flexión.	127
Tabla 3.20. Cuadro comparativo de los resultados de las deformaciones unitarias registradas en los ensayos de flexión.....	128
Tabla 3.21. Resumen estadístico de los resultados de deformaciones unitarias en los ensayos de flexión.	129
Tabla 3.22. Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas a tracción de los materiales compuestos híbridos y de la matriz de polipropileno.	131
Tabla 3.23. Cuadro comparativo de los resultados de resistencia al impacto.	132
Tabla 3.24. Densidades teóricas y reales de los materiales elaborados.	135
Tabla 3.25. Cuadro general de resultados de las propiedades mecánicas de compuestos híbridos de polipropileno, fibra de abacá y fibra de vidrio.	138
Tabla 3.26. Propiedades mecánicas de compuestos de PLA y fibras naturales de abacá.	142
Tabla 3.27. Propiedades mecánicas de la resina poliéster y compuesto reforzado con fibra de cabuya.	144
Tabla 3.28. Propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá.....	145
Tabla 3.29. Propiedades mecánicas de compuestos de poliéster reforzado con fibras de abacá.	147
Tabla 3.30. Propiedades mecánicas de diferentes compuestos híbridos.	149

Tabla 3.31. Propiedades mecánicas de diferentes compuestos híbridos.	150
Tabla 3.32. Propiedades específicas de compuestos híbridos de matriz polipropileno.....	152
Tabla 3.33. Resiliencia de los materiales.....	154
Tabla 3.34. Tenacidad de los materiales.	155
Tabla 3.35. Valoración de criterios de selección.	156
Tabla 3.36. Evaluación del peso específico del criterio <i>obtención</i>	156
Tabla 3.37. Evaluación del peso específico del criterio <i>costo</i>	157
Tabla 3.38. Evaluación del peso específico del criterio <i>funcionalidad</i>	157
Tabla 3.39. Tabla de conclusiones.	157
Tabla 3.40. Configuraciones de los posibles materiales para elaborar el prototipo.	158
Tabla 3.41. Propiedades mecánicas de las configuraciones.....	158
Tabla 3.42. Valoración de los criterios de selección.....	159
Tabla 3.43. Evaluación del peso específico <i>peso</i>	159
Tabla 3.44. Evaluación del peso específico <i>resistencia al impacto</i>	159
Tabla 3.45. Evaluación del peso específico <i>facilidad de elaboración</i>	159
Tabla 3.46. Evaluación del peso específico <i>precio</i>	160
Tabla 3.47. Tabla de conclusiones de selección del material compuesto híbrido.....	160
Tabla 3.48. Parámetros de calentamiento ensayados para termoformado.	161
Tabla 3.49. Estimación de costos de la materia prima.	163
Tabla 3.50. Estimación de costos del molde tipo macho-hembra.....	164
Tabla 3.51. Estimación de costos de la matriz para las canilleras.	164
Tabla 3.52. Estimación de costos de operación de los equipos.	165
Tabla 3.53. Costo de mano obra y costo final del prototipo.	166
Tabla 3.54. Resultados finales del ensayo de impacto en la canillera de referencia.	167
Tabla 3.55. Resultados finales del ensayo de impacto en la canillera con el material compuesto híbrido con refuerzo al 25 vol% de fibra corta de abacá de 20 mm.....	167
Tabla 3.56. Resultados finales del ensayo de impacto en la canillera con el material compuesto híbrido al 20 vol% de fibra continua de abacá.	167
Tabla 3.57. Determinación de fallas a diferentes alturas para canilleras sobre el yunque.....	169
Tabla 3.58. Descripción de los efectos producidos en el compuesto híbrido FL2004 por el impactador de acero.	170
Tabla 3.59. Descripción de los efectos producidos en el compuesto híbrido FC252002 por el impactador de acero.	171

SIMBOLOGÍA

DSC	calorimetría diferencial de barrido
FOB	free on board (libre a bordo)
HDPE	polietileno de alta densidad
LLDPE	polietileno lineal de baja densidad
PP	polipropileno
USD	dólares de los Estados Unidos de América
ΔH_m	entalpía de fusión experimental
ΔH_m^0	entalpía de fusión del material 100% cristalino
B	ancho de la probeta de flexión
D_f	diámetro de la fibra
ϵ	deformación unitaria a carga máxima
E	módulo a tracción
E_f	módulo a flexión
F	carga o fuerza máxima aplicada
H	espesor de la probeta de flexión
L	span, separación entre apoyos de la mordaza para ensayos de flexión
L	largo de la probeta de flexión
L/d	longitud/diámetro
L_{Cf}	longitud crítica de la fibra
MFI	índice de fluidez
M_{fibra}	masa de fibra
$M_{máx}$	momento flector máximo
M_{PP}	masa de polipropileno
MVR	tasa de fusión volumétrica
P_1	presión aplicada en la fase de precalentamiento
P_2	presión aplicada en la fase de moldeo
P_3	presión aplicada en la fase enfriamiento
Q_m	absorción de agua de las muestras
$S_{flex@5\%}$	esfuerzo máximo a flexión hasta una deformación unitaria del 5%
$S_{máx}$	esfuerzo máximo a tracción
S_{ut}	esfuerzo último a tracción
S_{ut_f}	esfuerzo último (rotura) de la fibra
T	error implicado en la eliminación de un dato
T_1	temperatura en la fase de precalentamiento
t_1	tiempo de la fase de precalentamiento
T_2	temperatura en la fase de moldeo
t_2	tiempo de la fase de moldeo

T_3	temperatura inicial del agua de enfriamiento
t_3	tiempo de la fase de enfriamiento
T_m	temperatura de fusión del PP
x_i	valor de la muestra i
\bar{x}_n	valor medio de las muestras
ρ	densidad, en g/cm^3
ρ_{H_2O}	densidad del agua destilada
ρ_o	densidad conocida de un líquido de referencia
σ_n	desviación estándar de las muestras
$^\circ\text{C}$	grado Celsius
μm	micrómetro
cm	centímetro
g	gramo
g/cm^3	gramo/centímetro cúbico
g/l	gramo/litro
GPa	giga Pascal
J/g	joule/gramo
Kg	kilogramo
kg/mm^2	kilogramo/milímetro cuadrado
kgf/cm^2	kilogramo fuerza/centímetro cuadrado
kJ/m^2	kilojoule/metro cuadrado
kN	kilo Newton
kPa	kilo Pascal
lbf	libra fuerza
m	metro
min	minuto
ml/s	mililitro/segundo
mm	milímetro
mm/min	milímetro/minuto
mm/mm	milímetro/milímetro
mm^2	milímetro cuadrado
mm^3	milímetro cúbico
MPa	mega Pascal
nm	nanómetro
Pa	Pascal
s	segundo
Tm/ha	tonelada métrica/hectárea
Ton	tonelada
W	Watt
Ω/cm	ohm/centímetro

RESUMEN

En este trabajo se ha obtenido un compuesto de polipropileno con refuerzo híbrido de fibras de vidrio y abacá. El objetivo fue estudiar la influencia de la adición de las fibras naturales y sintéticas sobre las propiedades mecánicas de los materiales formulados. Para ello se fabricaron moldes para obtener placas de compuesto tipo sánduche, de las cuales se extrajeron probetas para ensayos de tracción, flexión e impacto. El refuerzo combinó mats de fibra de vidrio con fibras de abacá continuas longitudinales o fibras cortas de 10 o 20 mm de longitud distribuidas aleatoriamente. Las fracciones volumétricas del refuerzo híbrido fueron 0,20 y 0,25, con combinaciones de abacá / vidrio en proporciones de 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 %. Los resultados evidenciaron que el refuerzo híbrido mejora el desempeño del polipropileno. El compuesto híbrido reforzado a 50/50% de fibra longitudinal abacá / vidrio en una fracción de 0,25 alcanzó la mayor resistencia a la tracción de 140 MPa, a flexión de 75 MPa y a impacto 9 J. Esto representó un incremento de 5, 3 y 3 veces, respectivamente, en comparación con la matriz. El módulo de elasticidad promedio para tracción fue de 11096 MPa y para flexión fue de 4415 MPa. Al comparar con la matriz esto representa un incremento de 9 y 4 veces, respectivamente. Finalmente, se fabricó un prototipo de una canillera con el material que presentó desempeños superiores a impacto y que requiere de menos tiempo de elaboración, de tal forma que pueda ser competitivo al compararlo con respecto a un producto existente en el mercado. Es por esto que el material híbrido con el que se elaboró la canillera tiene una fracción volumétrica de refuerzo 0,25 y una proporción fibra corta de abacá de 20 mm / fibra de vidrio de 25/75% presentó menor deformación al impacto que la elaborada con el material convencional de polipropileno.

PRESENTACIÓN

El estudio de los materiales compuestos de matriz polipropileno (PP) y refuerzo híbrido de fibras de abacá y vidrio en el presente proyecto de titulación permitió determinar sus propiedades y compararlas con la matriz pura. La fibra de abacá utilizada durante la ejecución de este trabajo fue originaria de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas en el Ecuador y demuestra como puede aprovecharse este recurso natural en la elaboración de nuevos materiales. Se empleó el proceso de moldeo por compresión con el objetivo de obtener un nuevo material con mejores propiedades mecánicas que las de sus componentes. Los materiales compuestos con distintas fracciones volumétricas y configuraciones fueron evaluados mediante ensayos de tracción, flexión e impacto. Finalmente, a partir de la mejor configuración de material compuesto híbrido se elaboró un prototipo. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto PIC-08-493 “Desarrollo de Nuevos Materiales para aplicaciones Estructurales e Industriales” cofinanciado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT).

En el primer capítulo se describen las características, propiedades y origen de la materia prima utilizada para la elaboración del material compuesto híbrido. Además, se describen las propiedades de los materiales termoplásticos empleados como matrices de materiales compuestos, sus ventajas y desventajas al compararlos con otros polímeros. En lo que respecta al material de refuerzo, se tiene que está formado por dos diferentes tipos de fibras: una fibra sintética (fibras de vidrio) y una fibra natural (fibra de abacá). Finalmente, se detallan las propiedades que los componentes de un material compuesto deben cumplir para asegurar su correcta obtención por el método de moldeo por compresión.

En el segundo capítulo se encuentra la información sobre la metodología seguida para obtener del material compuesto híbrido y el equipo requerido para su procesamiento y caracterización. Además, se describen los materiales empleados y se especifican los parámetros que intervienen en el procesamiento de los compuestos. Finalmente, se describen los criterios de selección del prototipo

fabricado con la configuración que presentó la mejor combinación de propiedades mecánicas.

En el tercer capítulo, se presentan, analizan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización del material en estudio de acuerdo a los procedimientos de ensayos descritos en el Capítulo 2. A continuación, se analizan los resultados de la caracterización mecánica tanto de la matriz polipropileno puro como de las distintas formulaciones de materiales compuestos híbridos a tracción, flexión e impacto, así como de su matriz de polipropileno en sus 27 configuraciones posibles donde varía la cantidad del refuerzo al 20 y 25 vol% así como también el tipo y orientación de la fibra de abacá, siendo esta dispersa de 10 y 20 mm y longitudinal continua.

Se emplearon refuerzos con fracción volumétrica de 0.20 y 0.25 y combinaciones de fibras %abacá / %vidrio: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0, dando como resultado en un incremento de las propiedades mecánicas del material para la configuración que tiene 25 vol% (fibra continua de abacá 50% / fibra de vidrio 50%). Esta configuración, presentó un aumento de la resistencia máxima a la tracción de 5 veces la resistencia de la matriz de polipropileno y 9 veces superior en el módulo de elasticidad. Otra configuración que registró valores de resistencia a la flexión superior a la matriz es aquella que tiene como refuerzo 25 vol% fibra corta de abacá de 20 mm con 25% fibra de vidrio, donde su resistencia máxima a la flexión fue aproximadamente 2 veces superior que la matriz sin refuerzo y su módulo de elasticidad aproximadamente 4 veces mayor que el módulo de la matriz. A impacto se obtuvieron diferencias similares en la capacidad del material para absorber energía de este tipo. Además, en este capítulo se selecciona un prototipo fabricado con los materiales obtenidos en este estudio.

En el cuarto capítulo se detallan las conclusiones que surgieron del análisis de resultados y experiencias en el desarrollo del presente proyecto, así como también se presentan recomendaciones para estudios posteriores tomando en cuenta las propiedades mecánicas registradas en los ensayos de tracción, flexión e impacto.

CAPÍTULO 1

MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

En este capítulo se describen aspectos fundamentales de los materiales compuestos híbridos así como también la terminología utilizada en el área de los materiales compuestos poliméricos. Además, se presenta un resumen de sus principales propiedades mecánicas, métodos de procesamiento y aplicaciones. Seguidamente, se exponen las principales características de la fibra de abacá y la fibra de vidrio, las cuales se emplearon como refuerzo para la obtención de los materiales compuestos híbridos. Para concluir, se presenta el resumen de las propiedades mecánicas de otros materiales compuestos estudiados en la Escuela Politécnica Nacional.

1.1. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA

Los primeros materiales compuestos sintéticos aparecieron durante la Segunda Guerra Mundial. Eran materiales heterogéneos, constituidos por una matriz plástica asociada con un refuerzo fibroso, que por lo general era fibra de vidrio o de carbono. Estos materiales eran termoestables y su historia empieza a menos de 50 años. El tiempo de desarrollo ha sido relativamente corto con más de una docena de procedimientos de aplicación. Además, se conoce que el mercado mundial de los materiales compuestos ha crecido en forma significativa desde 1994, un 5,7% anual en cantidad, hasta que en el 2000 se produjeron siete millones de toneladas. Se estima que en el 2011, la producción alcanzó los 10 millones de toneladas [1].

Los materiales compuestos están formados por la combinación de dos o más materiales de distintos grupos (metálicos, polímeros y cerámicos). Es decir, están constituidos por elementos químicamente dispares y posee propiedades que no se encuentran en ninguno de los materiales en forma individual. Estos materiales tienen un amplio espectro de aplicación, que va desde elementos estructurales y

arquitectónicos en el área de la construcción hasta aplicaciones más avanzadas tecnológicamente en las industrias aeroespacial, automovilística, aeronáutica y de la energía.

Las aplicaciones aeronáuticas de estos los materiales compuestos termoplásticos van en aumento. Como muestra, el famoso constructor de aeronaves Stork Fokker lleva años empleando estos composites en sus productos. Bordes de ataque (leading edge, también conocidos como J-Nose) para los Airbus A340 con refuerzo de fibra de vidrio, sustitución de elementos metálicos en las D-noses por paneles sandwich con núcleo de Nomex (DuPont Advanced Fiber Systems), paneles para el fuselaje, alas, superficies de control y cono de cola del Airbus A380, Boeing 747-8 y JSF así como para el Gulfstream G650 business jet.

En los 80s, las láminas de termoplásticos Polyetherimide (PEI) comenzaban a ser usadas en los pisos de las aeronaves. Las terminaciones de estos pisos se hacían con fibra de vidrio y de carbono en los modelos Fokker 100 de carga y Gulfstream G400, G500 y Airbus Beluga, respectivamente. Poco después, en los 90s estos materiales dejaron de ser usados exclusivamente en zonas de responsabilidad baja para ser empleados en costillas de las alas del G500.

Ya en el año 2000, cuando el programa de desarrollo de los bordes de ataque para el modelo de Airbus A340 comenzaba, Fokker moldeaba sus piezas con fibra de vidrio y matriz de PPS (suministrada en láminas consolidadas por Ten Cate Advanced Composites). El proceso utilizado era el de moldeo por compresión para costillas y rigidizadores, sin embargo los paneles para los bordes de ataque del A380 eran demasiado largos para que cupieran en una prensa común. Por otro lado, estos paneles debían ser reforzados en ciertas zonas de agarre. De esta manera, Fokker y Ten Cate desarrollaron los semipreg, tejidos con termoplásticos que imitaban la tecnología de lay-up de los compuestos de matriz termoestable para ser conformados a su forma definitiva en autoclave. La diferencia estriba en que los materiales auxiliares deben soportar mayores temperaturas de conformado.

De manera similar, en Francia por ejemplo, el sector automovilístico y de los vehículos industriales consume más de la tercera parte de la producción en

volumen de compuestos, los cuales se utilizan para reforzar paneles de revestimiento, deflectores, elementos de carrocería, elementos de defensa y puertas traseras. Éstos materiales compuestos son mucho más ligeros y permiten a los constructores aceptar un sobrecosto por kilogramo ahorrado. La disminución del peso total en un vehículo permite un ahorro de combustible de aproximadamente €1,5 por 100 km [2].

En el campo de los materiales compuestos en general se pueden tener dos tipos de matrices: los termoplásticos mencionados anteriormente y los termoestables. De éstos, los polímeros termoplásticos tienen un espectro de mayor aplicación que los termoestables. Según Béguin [3], el crecimiento anual en la utilización de compuestos de matriz termoplástica es del 9% mientras que el de matriz termoestable es del 3%. Además, se estima que las aplicaciones principales están distribuidas como se muestra en la Figura 1.1. Por este motivo el presente trabajo se orienta al estudio de materiales compuestos de matriz termoplástica que se basa en la naturaleza del material así como también en la forma de la pieza que se va a realizar, las presentaciones deseadas y los criterios de producción en términos de cantidad y calidad.

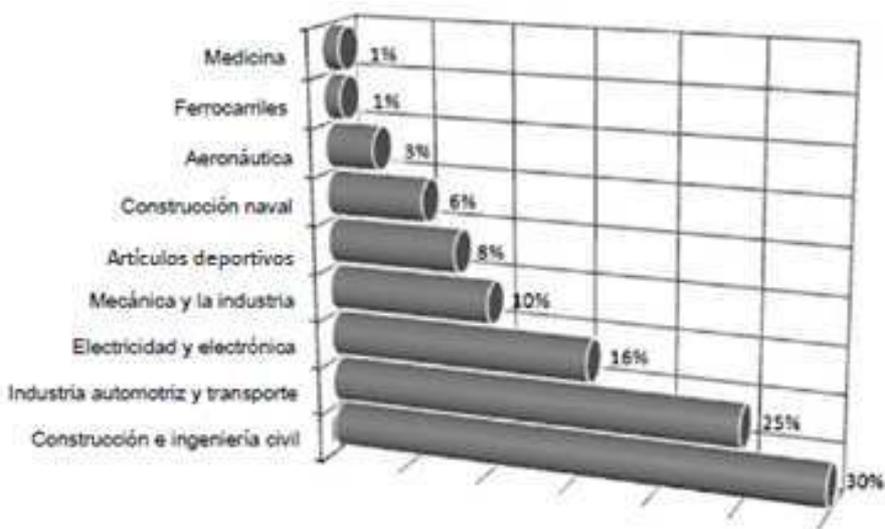


Figura 1.1. Sectores de aplicación más comunes de los materiales compuestos termoplásticos (Biron, 2007).

1.1.1. CLASIFICACIÓN

De manera general, los materiales compuestos con fines estructurales se pueden clasificar según el tipo de matriz y según el tipo de refuerzo. De acuerdo al tipo de matriz, un material compuesto puede ser: (i) metálico, (ii) cerámico y (iii) polimérico. En forma similar, según el tipo de refuerzo, los materiales compuestos se clasifican como se muestra en la Figura 1.2.

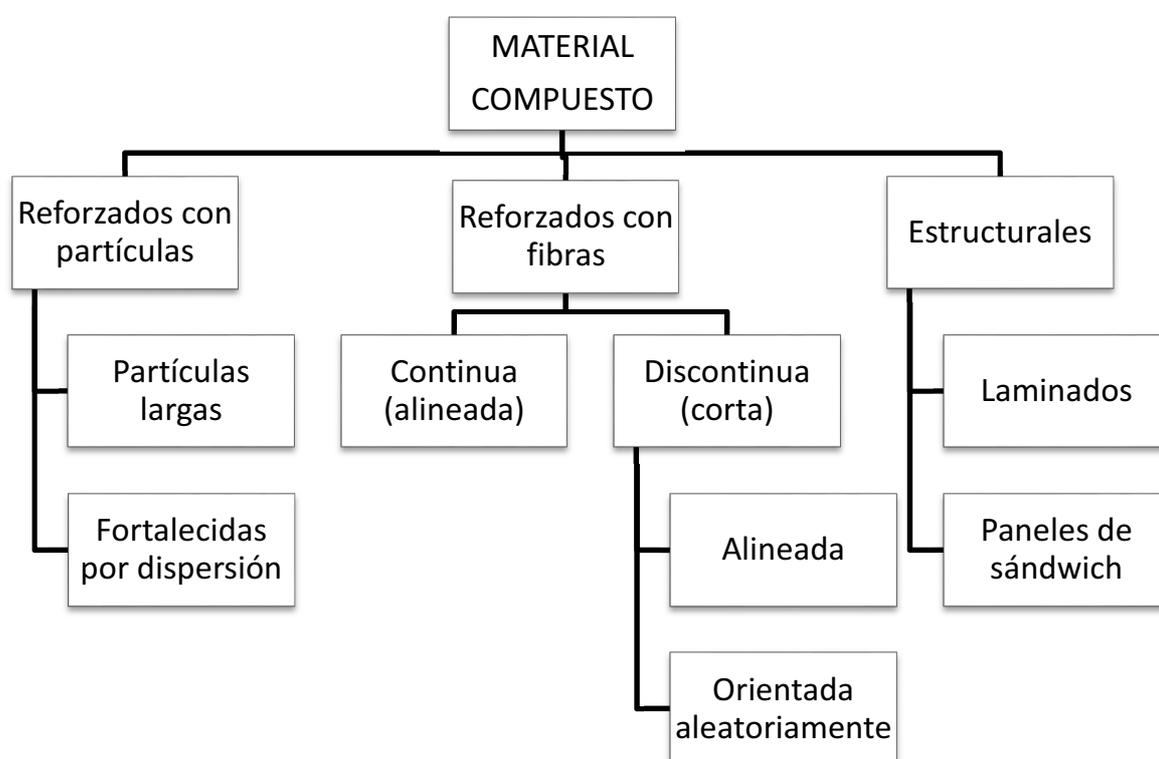


Figura 1.2. Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo. (Calister, 2007)

Otra clasificación aceptada que menciona Ashby se da de acuerdo a la idea de que la combinación de dos o más materiales forman un material híbrido. Así, los materiales híbridos se subdividen en: (i) compuestos, (ii) materiales tipo sánduche; (iii) enrejados y (iv) estructuras segmentadas. Esta clasificación se puede observar en la Figura 1.3.

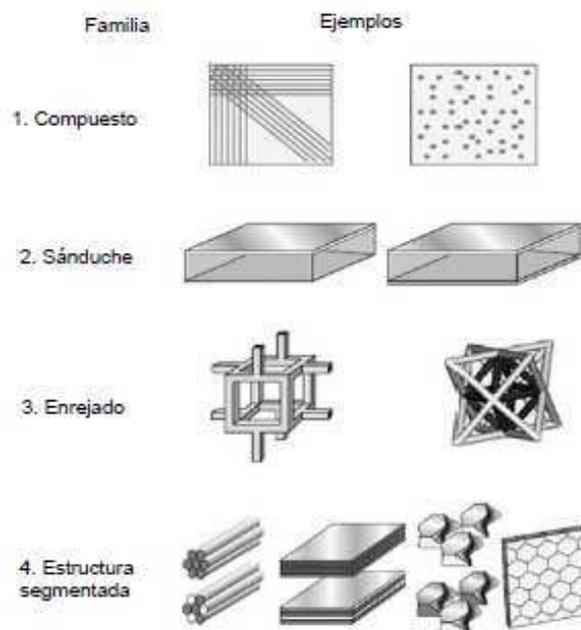


Figura 1.3. Clasificación de los materiales híbridos. (Ashby, 2011)

A continuación, se presenta una definición más amplia de los mismos y sus componentes, así como también los métodos de procesamiento para su obtención.

1.1.2. DEFINICIÓN

Un material compuesto o composite puede definirse como un sistema de materiales formado por la mezcla de dos o más micro o macro constituyentes, los cuales difieren entre sí en cuanto a su forma, tamaño, composición y solubilidad. Los componentes esenciales de todo material compuesto son dos: la matriz y el refuerzo. La matriz constituye la fase continua, soporta al refuerzo y lo mantiene en la posición establecida. Además, le transfiere carga y lo protege de los daños durante su manufactura y uso. Por otra parte, el refuerzo o fase discontinua se caracteriza por su baja densidad y alta resistencia, su función es soportar la carga a la que se encuentra sometido el material. Cabe indicar que las propiedades de un material compuesto dependen tanto de las propiedades de los materiales que lo constituyen como de su distribución e interacción [4]. A continuación, en la Figura 1.4, se ilustra la configuración básica de un material compuesto.

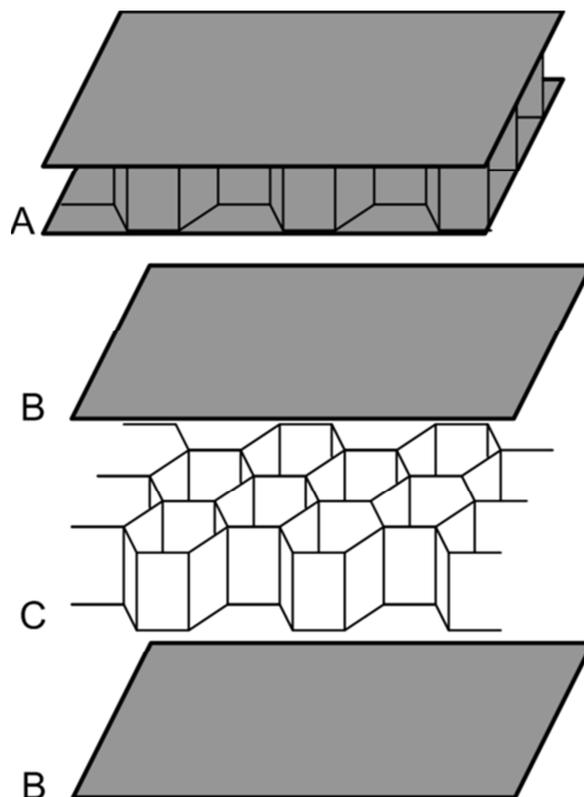


Figura 1.4. Configuración básica de un material compuesto tipo sánduche mostrando panel completo (A), láminas de matriz (B) y núcleo de refuerzo (C).¹

La superficie de conexión entre la matriz y el refuerzo se denomina interfaz, la misma que permite transmitir efectivamente la fuerza a las fibras siempre que se tenga una buena interacción matriz-refuerzo. Cabe indicar que con la finalidad de mejorar la interfaz del material compuesto es posible adicionar agentes de acoplamiento, normalmente en bajos porcentajes, como el anhídrido maleico (MAAP), rellenos como la espuma de polímero, carbonato de calcio y revestimientos. En la Figura 1.5 se ilustran los principales elementos que caracterizan a un material compuesto.

¹ Diagram of a composite sandwich panel (see [1]) showing complete panel ("A"), face plates/sheets ("B"), and honeycomb core ("C") (alternately, foam core). Trabajo de George William Herbert.

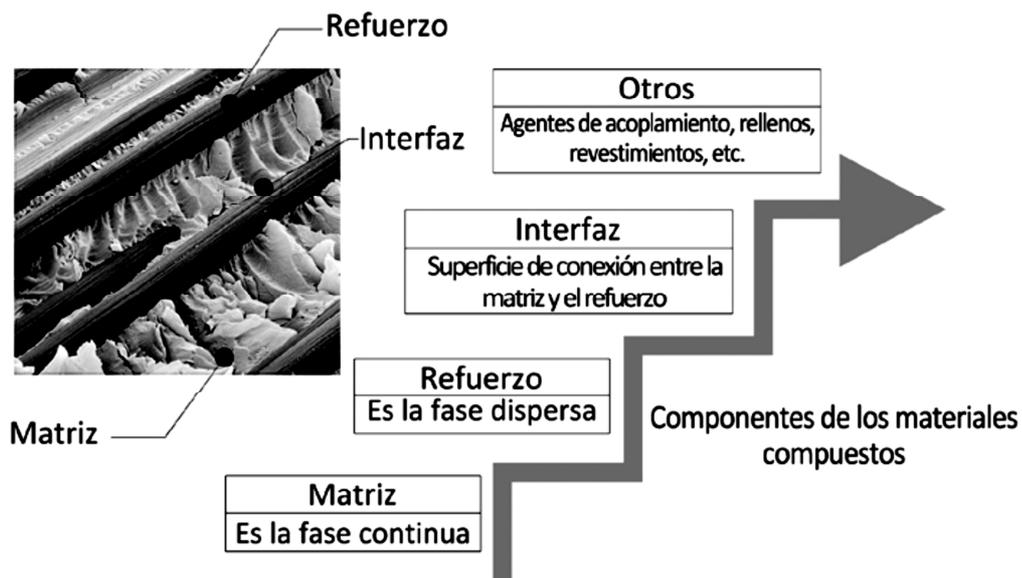


Figura 1.5. Elementos característicos de los materiales compuestos.²

Asimismo, con el objeto de mejorar las propiedades que presenta la matriz, en la fabricación de composites, se adicionan refuerzos sintéticos o naturales, ya que estos pueden soportar mayores cargas e incorporar nuevas propiedades estructurales. Entre los refuerzos de origen natural se tiene a las fibras vegetales, las cuales presentan ventajas con respecto a las de origen sintético debido a su resistencia mecánica, bajo peso y costo reducido. Además, pueden ser blandas, duras y de superficie característica que las hace idóneas para una diversidad de aplicaciones.

Por otra parte, los materiales compuestos de matriz polimérica, según la naturaleza de la matriz pueden clasificarse en: termoplásticos, termoestables y elastoméricos. El polímero termoplástico está formado por cadenas moleculares muy largas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas relativamente débiles del tipo Van der Waals. Cuando el polímero se calienta, las fuerzas moleculares se debilitan por lo que el polímero se vuelve suave y flexible, y a altas temperaturas se funde. Un polímero termoplástico puede fundirse, moldearse y solidificarse en varias ocasiones; durante su proceso de moldeo, no sucede una reacción química, sino que solo lleva consigo cambios físicos, como los cambios de fase por los que estos polímeros pueden reciclar.

² CEDEÑO, E.; et al; Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Editor Guerrero, V.; Quito; 2011.

El polímero termoestable se produce mediante una reacción química de dos etapas. La primera etapa produce moléculas de cadenas largas como sucede con los termoplásticos, pero éstas aún pueden seguir reaccionando. La segunda etapa ocurre durante el proceso de moldeo, normalmente mediante la aplicación de presión y calor. Cuando la parte moldeada se enfría se vuelve rígida y forma en términos moleculares una estructura (una red) con uniones permanentes muy fuertes entre sus cadenas moleculares que no pueden ser destruidas mediante la aplicación de calor a menos que se degrade el polímero.

El presente trabajo de investigación se centra en la obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz termoplástica. Por ello, en este capítulo se profundizará únicamente en el estudio de los mismos.

Los polímeros termoplásticos a diferencia de los termoestables y elastoméricos se comportan de una manera plástica y dúctil, se pueden reciclar con facilidad y pueden ser procesados por extrusión, moldeo por inyección, compresión y soplado. Los termoplásticos se ablandan al calentarse y se endurecen al enfriarse. Estos procesos son totalmente reversibles y pueden repetirse. Normalmente estos materiales se fabrican con aplicación simultánea de calor y presión. En la Tabla 1.1 se citan los polímeros termoplásticos más utilizados en aplicaciones estructurales a nivel industrial.

Tabla 1.1. Marcas registradas, características y aplicaciones típicas de polímeros termoplásticos.

Tipo de material	Marcas registradas	Características	Aplicaciones
Acrílicos (poli metacrilato de metileno).	Lucite; Plexiglás.	Extraordinaria transmisión de la luz y resistencia a la degradación ambiental, propiedades mecánicas regulares.	Lentes, ventanas de avión, material para dibujar, letreros exteriores.
Fluorocarbonos (PTFE o TFE).	Teflon TFE, Halon TFE.	Químicamente inertes en la mayoría de los ambientes, excelentes propiedades eléctricas, bajo coeficiente de fricción.	Aislamientos anticorrosivos, tuberías y válvulas, cojinetes, recubrimientos antiadherente.

Continuación de la Tabla 1.1

Tipo de material	Marcas registradas	Características	Aplicaciones
Nilonos	Zytel, Plaskon.	Buena resistencia mecánica, a la abrasión y tenacidad; bajo coeficiente de fricción; absorbentes del agua y otros líquidos.	Cojinetes, engrane, levas, palancas, y recubrimientos de alambres y cables.
Policarbonatos	Merlon, Lexan.	Dimensionamiento estable; baja absorción de agua; transparencia; gran resistencia al impacto y ductilidad; extraordinaria resistencia química.	Cascos de seguridad, lentes globos para alumbrado, bases para películas fotográficas.
Polietileno	Alathon, Petrothene, Hi-fax.	Químicamente resistente y eléctricamente aislante; blandos y con bajo coeficiente de fricción; baja resistencia mecánica y poca resistencia a la degradación ambiental.	Botellas flexibles, juguetes, vasos, carcasas de pilas, cubiertas, láminas para embalaje.
Polipropileno	Pro-fax, Tenite, Moplen.	Resistencia a la distorsión térmica; excelentes propiedades eléctricas y resistencia fatiga; químicamente inerte; relativamente barato; poca resistencia a la radiación ultravioleta.	Botellas esterilizables, láminas para embalaje, televisores, maletas.
Poliestireno	Styron, Lustrex, Rexolite.	Excelentes propiedades eléctricas y claridad óptica; buena estabilidad térmica y dimensional; relativamente económico.	Tejados, electrodomésticos, carcasas de pilas, juguetes, paneles de alumbrado doméstico.
Vinilos	PVC, Pliovic, Saran, Tygon.	Materiales para aplicaciones generales y económicas; ordinariamente rígidos pero con plastificantes se vuelven flexibles; a menudo copolimerizado; susceptible a la distorsión térmica.	Recubrimientos de suelo, tuberías, recubrimientos aislantes de hilos eléctricos, mangas de riego, discos fonográficos.
Poliéster (PET)	Mylar, Celanar, Dacron.	Una de las películas plásticas más blandas; excelentes resistencias a la fatiga, a la torsión, a la humedad, a los ácidos, a los aceites y a los disolventes.	Cintas magnetofónicas, paños, encordelado de neumáticos.

1.1.3. POLIPROPILENO

El polipropileno (PP) es un termoplástico semi-cristalino y se obtiene en su forma homopolimérica, mediante la polimerización del monómero de polipropileno usando catalizadores Ziegler-Natta estereoespecífica. El sistema de catalizadores se denomina estereoespecífico porque controla la posición del grupo metil en cada unidad de propileno en la cadena polimérica. Un sistema de catálisis típico puede prepararse combinando tricloruro de titanio con tributilo de aluminio o sus variantes. La utilización comercial de la polimerización por coordinación en 1957 hizo posible la producción de polipropileno, convirtiéndose en la década siguiente en uno de los principales plásticos mundiales con una producción, en los Estados Unidos, cercana a las 1000 millones de lb en 1969, a un precio aproximado de 0,20 \$/lb.

El monómero mostrado en la Figura 1.6 se obtiene por craqueo del gas natural o aceites ligeros. Si la polimerización se realiza sin catalizador se obtiene un polímero atáctico, que no cristaliza y presenta una baja resistencia mecánica. En presencia de catalizadores Ziegler se obtiene un polímero altamente isotáctico, cristalino, de elevada rigidez, dureza y temperatura de reblandecimiento mayor que el polietileno.

Para que ocurra la polimerización, al medio de reacción, nafta, se añade el catalizador y el monómero a presión. La temperatura de reacción es de 60°C y el tiempo de reacción es 8 horas. El grado de conversión es de alrededor del 85%. El polímero cristalino precipita. Tras la reacción se obtiene una mezcla de: polímero isotáctico, algo de polímero atáctico, nafta, monómero sin reaccionar y catalizador. Los diferentes disposiciones estéricas de los grupos metilo unidos a cada segundo átomo de carbono en la cadena se muestran en la Figura 1.7. Después de la separación, se consigue el polímero isotáctico, que es el de interés comercial.

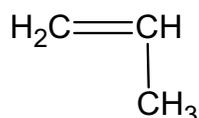
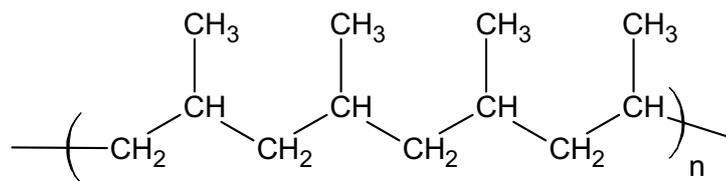
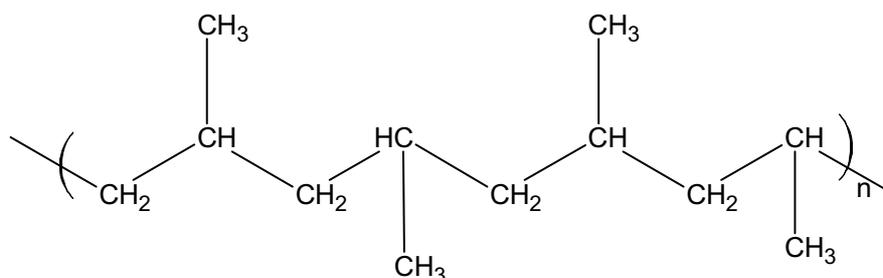


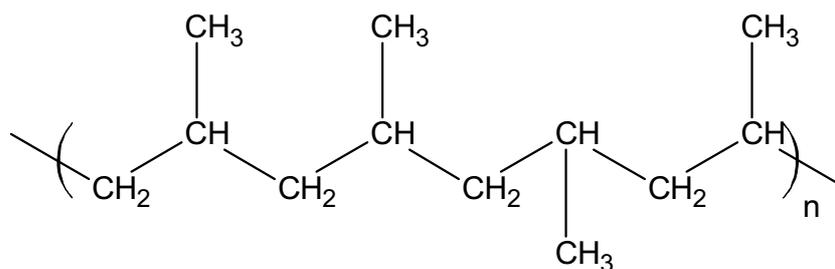
Figura 1.6. Monómero de polipropileno.



a) Polipropileno isotáctico



b) Polipropileno sindiotáctico



c) Polipropileno atáctico

Figura 1.7. Molécula de polímero PP en formas: (a) isotáctico, (b) sindiotáctico y (c) atáctico.

El PP es muy popular como plástico en artículos de producción y consumo masivo; sin embargo, este también es referido como un plástico ingenieril de bajo costo. En comparación con el polietileno de baja y alta densidad este material presenta una rigidez elevada, densidad y resistencia muy bajas a temperaturas elevadas cuando no está sujeto a esfuerzos mecánicos. Debido a que este material resiste continuas y prolongadas flexiones se lo utiliza para hacer fundas y pedales de acelerador de automóviles, etc. En inyección o moldeo por soplado, se lo utiliza para elaborar equipos esterilizables, equipajes, piezas de automóvil, máquinas de lavar, cisternas de servicios, tanques para transportes de líquidos, películas o láminas antiadherentes, tuberías, recubrimiento de cables y botellas,

entre otros. Además, el PP ofrece alta resistencia a la fatiga, resistencia química, buena resistencia al agrietamiento por esfuerzos, dureza y facilidad de maquinado, así como la capacidad de procesamiento por moldeo por inyección y extrusión. La extrusión permite obtener piezas de sección transversal constante, mientras que la inyección genera grandes volúmenes de producción, y con ello impulsa la implantación de procesos de automatización lo cual se traduce en la reducción significativa los costos de producción [5]. Las propiedades mecánicas que presenta el PP en relación a otros polímeros termoplásticos de uso comercial se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas de los termoplásticos de mayor uso comercial. [6]

Propiedad	PP	LDPE	HDPE	HIPS	PVC	ABS
Módulo de flexión (GPa)	1,50	0,30	1,30	2,10	3,00	2,70
Esfuerzo tensil (MPa)	33	10	32	42	51	47
Densidad específica	0,905	0,92	0,96	1,08	1,4	1,05
Módulo específico (GPa)	1,66	0,33	1,35	1,94	2,14	2,57
Temperatura máxima de uso continuo (°C)	100	50	55	50	50	70
Dureza superficial	RR90	SD48	SD68	RM30	RR110	RR100
Costo (USD/tonelada)	1043,08	1153,71	1043,08	1382,87	1430,28	2449,65
Módulo por unidad de costo (MPa/USD)	2,27	0,41	1,97	2,40	3,31	1,74

ABS = acrilonitrilo-butadieno-estireno

HIPS = Poliestireno de alto impacto

RR = Rockwell R

RM = Rockwell M

SD = Durómetro Shore

De acuerdo a los datos expuestos en la tabla anterior, es posible determinar que el PP ofrece ventajas competitivas en relación a los demás materiales poliméricos de uso industrial. El módulo específico (módulo de la razón de densidad), la temperatura de deflexión por calor (HDT), la temperatura de uso continuo máxima y el módulo por unidad de costo, son algunos de los parámetros que permiten establecer dichas ventajas. Asimismo, es necesario resaltar que el proceso de

producción del PP no representa un riesgo potencial para los ríos y lagos ya que el agua que interviene en dicho proceso se recicla y se reutiliza de manera indefinida.

Por otra parte, el uso del PP también presenta desventajas en comparación con otros polímeros termoplásticos, estas diferencias se pueden observar en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Comparación del PP no modificado con otros materiales: desventajas. [6]

Propiedad	PP	LDPE	HDPE	HIPS	PVC	ABS
Contracción (%)	1,90	3,00	3,00	0,50	0,40	0,60
Expansión térmica (x10 ⁻⁵)	10,00	20,00	12,00	7,00	6,00	8,00
Resistencia al impacto (kJ/m) at 23 °C	0,07	>1,06	0,15	0,10	0,08	0,20

Según se muestra en la tabla anterior, el PP tiene una contracción y expansión térmica alta por lo que controlar sus dimensiones finales requiere de procesos rigurosos. Además, su resistencia al impacto es menor en comparación con el HIPS, el PVC y el ABS. Asimismo, tiene menor resistencia a los rayos UV y como cualquier material semi-cristalino sufre fluencia alta bajo carga sostenida.

El PP no representa de forma directa un riesgo para la salud; sin embargo, puede liberar compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el aire circundante durante procesos a elevada temperatura. Por ello, acciones preventivas como una ventilación adecuada podría minimizar la aparición de problemas futuros relacionados con la exposición continua a los VOCs.

En la actualidad, existen varios materiales con características y propiedades similares a las del PP, entre ellos se puede mencionar el poliestireno y sus derivados, el acetato celulósico (CA), el butirato acetato celulósico (CAB) y el policloruro de vinilo (PVC). El tereftalato de polietileno (PET), poliamida (PA), policarbonato (PC) y ABS, etc. En la Tabla 1.4 se muestran las ventajas y desventajas que presenta el PP con relación a los materiales poliméricos de uso industrial.

Tabla 1.4. Cuadro comparativo entre ventajas/desventajas de otros termoplásticos respecto al PP. [7]

Polímero	Ventajas	Desventajas
LDPE	Alta resistencia al impacto Baja temperatura de fragilidad	Baja resistencia y rigidez Baja dureza superficial
HDPE	Bajo costo Alta resistencia al impacto	Baja resistencia y rigidez Baja dureza superficial Baja temperatura de distorsión
HIPS	Baja contracción y deformación Mayor brillo Mayor rigidez	Baja resistencia química Agrietamiento por esfuerzos ambientales.
PVC	Mayor claridad Mayor procesamiento Mayor resistencia al desgaste	Perjudicial para el medio ambiente Baja resistencia al agrietamiento por esfuerzo, por solventes Temperatura de deflexión baja.
PET	Mayor transparencia Mayor barrera de Oxígeno Mejores propiedades al impacto	Malas propiedades de barrera No adecuado para llenado en caliente y esterilización Alto precio
ABS	Buena rigidez Mayor brillo Mejor procesabilidad	Alto precio y peso Baja resistencia a solventes Baja resistencia al calor
PC	Mayor transparencia Mayor tenacidad Mayor temperatura de uso continuo	Mayor densidad y precio Sensible al corte Baja resistencia a la fatiga
CA	Mayor transparencia Mayor Resistencia al impacto a bajas temperaturas	Baja resistencia a solventes Mayor absorción de humedad Alto costo
CAB	Mayor transparencia Mejor brillo	Baja resistencia a solventes Mayor absorción de humedad

1.1.3.1. Propiedades

Las propiedades mecánicas y térmicas del PP son dependientes de la isotacticidad, el peso molecular, su distribución, cristalinidad, y el tipo y cantidad de comonómeros. Adicionalmente, el PP es, al igual que otros termoplásticos, un material viscoelástico. Consecuentemente, sus propiedades mecánicas varían con el tiempo, la temperatura y el esfuerzo al que se someta al material. Las propiedades físicas del PP son las mostradas en la Tabla 1.5 [8]:

Tabla 1.5. Propiedades físicas del PP.

Propiedad	Unidades	Condiciones	Homopolímero propileno isotáctico
Límite elástico	MPa	ASTM D638	34,5
Deformación elástica (L/L ₀)	%	ASTM D638	10
Módulo de flexión	MPa	ASTM D790	1389
Resistencia al impacto Izod	J m ⁻¹	ASTM D785	27
Dureza	Rockwell	ASTM D785	R90
Temperatura de deflexión	K	ASTM D648	380
Tensión superficial γ	m N m ⁻¹	438 K	22,5
Coefficiente de permeabilidad	m ³ m s ⁻¹	H ₂ O, 298 K	3,83 x 10 ⁻¹⁶
Conductividad térmica	Wm ⁻¹ K ⁻¹	293 K	0,12
Índice de fluidez	g (10 min) ⁻¹	ASTM D1238, 503 K, 2,16 kg	0,2 -> 500
Temperatura de descomposición	K	TGA en helio, Montell Profax 6501	623

Densidad

La densidad típica del PP es 0,9 g/cm³ y es el más liviano entre los termoplásticos más usados en el mundo. Así, ofrece la ventaja de ser muy útil para la fabricación de muchos de ítems para un peso dado del polímero. El polimetilpentano (TPX), un termoplástico transparente semicristalino comercialmente disponible, tiene una densidad más baja (0,83 g/cm³) que el PP. A diferencia del PE, donde el cambio en el grado de cristalinidad resulta en variaciones de la densidad, la densidad del PP cambia poco sobre el rango total de homopolímeros y copolímeros.

Propiedades térmicas

A diferencia de los metales, los plásticos son extremadamente sensibles a los cambios de temperatura. Las propiedades mecánicas, eléctricas o químicas de los plásticos no pueden ser consideradas sin el pleno conocimiento de la

temperatura a la cual los valores se derivan. Las propiedades térmicas de un polímero típicamente determinan sus aplicaciones a alta o baja temperatura, propiedades al impacto y características de fabricación. Típicamente las aplicaciones a baja temperatura para el PP son, partes de refrigerador y en el envasado de alimentos que se exhiben en las estanterías. Las aplicaciones donde las propiedades a alta temperatura del PP son de interés particular incluyen, la esterilización, particularmente la esterilización por vapor, recipientes resistentes a hornos microondas, y partes para lavaplatos, las cuales están expuestas a agua caliente en presencia de detergentes.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del PP dependen de algunos factores y son fuertemente influenciados por el peso molecular. Observaciones generales sugieren que un incremento en el peso molecular, manteniendo todos los otros parámetros estructurales similares, conlleva a una reducción en la resistencia a la tracción, la rigidez, la dureza, el punto de fragilidad, pero un incremento en la resistencia al impacto. Este efecto del peso molecular sobre las propiedades del PP es contrario a la mayoría de otros plásticos bien conocidos.

Propiedades superficiales

Dureza y resistencia al rayado

La dureza se la define como la resistencia del material a la deformación, particularmente a la deformación permanente, indentación o rayadura. La dureza es un término relativo y no debe ser confundido con resistencia al desgaste o a la abrasión de plástico. Por ejemplo, el poliestireno tiene alta dureza pero una resistencia a la abrasión demasiado baja. Además, la dureza a la indentación del PP decrece con la temperatura como lo indica la Figura 1.8. La dureza del PP depende de su cristalinidad. Con el decremento de la masa molar, la cristalinidad decrece y así la dureza.

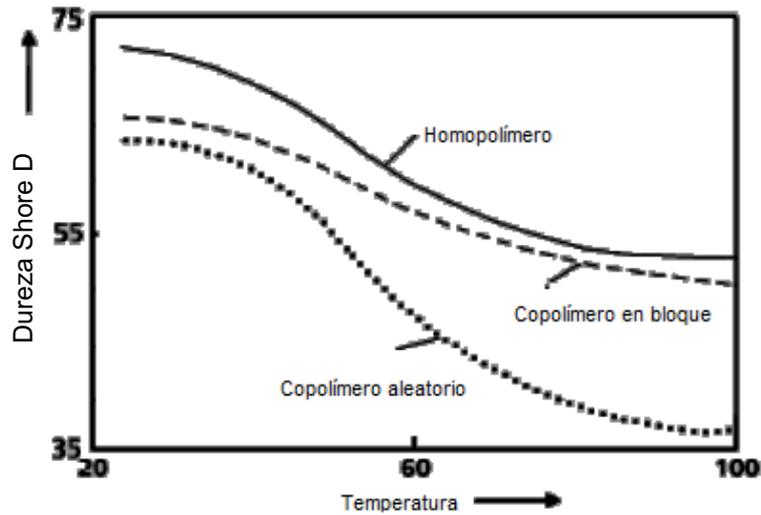


Figura 1.8. Dureza con indentador de bola del PP como una función de la temperatura (°C).

Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión se la define como la habilidad de un material a resistir la acción mecánica que tiende a remover progresivamente material de su superficie. La resistencia a la abrasión de un material polimérico es algo complejo. La resistencia a la abrasión es relacionada a otros factores, tales como la dureza, la resiliencia y el tipo y la cantidad de rellenos y aditivos añadidos. La resistencia a la abrasión depende de factores como las condiciones del ensayo, el tipo de abrasivo y el desarrollo y disipación del calor durante el ciclo de prueba.

La habilidad de un material para resistir a la abrasión es a menudo medida por su pérdida en peso cuando es desgastado. La abrasión Taber es ampliamente usada para medir la resistencia a la abrasión. En el ensayo de abrasión Taber, el espécimen de prueba es colocado en un soporte giratorio con una rueda abrasiva conveniente bajo un conjunto de cierto peso. El peso perdido después de un gran número de revoluciones (al menos 5000 revoluciones) es medido. Para materiales muy suaves, pueden ser usadas ruedas menos abrasivas con una carga muy pequeña sobre las ruedas.

1.1.3.2. Aplicaciones

Las principales aplicaciones del PP en los diferentes sectores del mercado se muestran en la Tabla 1.6. Algunos de los requerimientos críticos para estas aplicaciones se exponen en la Tabla 1.7.

Tabla 1.6. Aplicaciones del PP.³

Sector	Aplicaciones típicas
Artículos del hogar	Baldes, recipientes, cajas de botellas, juguetes, tapas de botellas, frascos, procesador de alimentos casero, cintas de vídeo, maletas.
Industria automotriz	Tanques de expansión del radiador, artículos y accesorios de frenos, cubre volante, revestimiento de rueda, parachoques, cubiertas de parachoques, bandas laterales, spoilers, guardabarros, cajas de baterías, cajas de herramientas.
Fibras	Superficies deportivas artificiales, monofilamentos para cuerdas y cordajes, cintas estiradas, bases de alfombras tejidas, bolsas de embalaje y lonas.
Electrodomésticos	Partes de lavavajillas como el marco superior, las juntas de extrusión, tuberías, compartimiento del suavizante de agua, etc.; partes de la máquina de lavado, como dispensador de detergente, marcos de puertas, tuberías de entrada y salida, fuelles, pies y ruedas, cubiertas y conductos, etc. . Partes del refrigerador como cajas, contenedores, cajones, tubos, tuberías de entrada y salida, etc.
Embalaje	Recipientes para margarinas y helados, bandejas compartimentadas de comida, paquetes de paredes delgadas como bandejas para alimentos, vasos y cajas para dulces.
Tubos y accesorios	Barras macizas, placas de perforación, tubería de aguas residuales domésticas, tubos de presión, intercambiadores de calor, tubos corrugados, tubos de pequeño diámetro, por ejemplo, los cartuchos de bolígrafo, sorbetes, entre otros.
Mobiliario	Sillas apilables.

Tabla 1.7. Requerimientos para aplicaciones, donde el PP es una de las mejores opciones como material.³

Aplicación	Requerimientos críticos
Sillas	Buena rigidez, buena tenacidad, colorabilidad, moldeabilidad en formas complejas
Parachoques	Alta resistencia al impacto a bajas temperaturas, excelente resistencia al desgaste y alta rigidez.
Secadores de pelo, planchas y Aparatos de cocina	Rigidez, superficie brillante, buena resistencia al envejecimiento térmico, Propiedades antiestáticas, alto HDT.
Embaces desechables para alimentos	Rigidez, transparencia (si se requiere), calor esterilizable, sin sabor, buen flujo y ciclos rápidos, bajo costo.

³ Vincent, M.; Álvarez, S.; Principales polímeros comerciales; editorial UPV; Valencia; 2006.

Continuación de la Tabla 1.7.

Aplicación	Requerimientos críticos
Jeringas, tubos, cartuchos	Transparencia, esterilizable e irrompible (tenacidad).
Cajas de video cassette	Resistencia a la fatiga, alta flexibilidad, deformación.
Tuberías y accesorios	Resistencia a la fricción, buena resistencia química, temperatura de uso continuo elevada, bajo ruido.
Equipaje	Resistencia al impacto y a la deformación.

1.1.3.3. Tipos básicos de polipropileno

Las propiedades físicas y características del PP están determinadas principalmente por el peso molecular (número promedio de unidades de propileno en una cadena), el tipo y grado de copolimerización de los monómeros. La selección correcta del grado o tipo de PP para una aplicación específica involucra:

- Seleccionar entre un homopolímero y un copolímero.
- Seleccionar un reactor en particular.
- Definir el índice de fluidez requerido y el sistema de aditivos adecuados.

a) Polipropileno homopolímero

El PP homopolimérico se obtiene mediante la polimerización del propileno en la presencia de un catalizador estereoespecífico. Los homopolímeros son más rígidos y tienen mejor resistencia a elevadas temperaturas que los copolímeros; sin embargo, su resistencia al impacto a temperaturas bajo cero es limitada. Entre las aplicaciones más comunes del polipropileno homopolimérico se tienen tanques para el lavado de parabrisas; cubiertas para ventiladores; carcasas de electrodomésticos como secadores de pelo, esterilizadores, planchas, cafeteras y tostadoras; en la extrusión de fibras y filamentos para alfombras; en telas de tapicería, geotextiles, pañales desechables, tela médica, etc.

b) Polipropileno copolímero

Un copolímero es una macromolécula que consta de más de un tipo de unidad de repetición o monómero. Las propiedades del PP dependen del tipo y la cantidad de copolímero y hay dos tipos básicos: el copolímero de bloque y el copolímero aleatorio. En un copolímero de bloque, un segmento largo formado por un

monómero es seguido de un segmento hecho con el otro monómero. Por ejemplo, se tiene el copolímero de bloque formado por el estireno y el butadieno. Al combinar dos monómeros con diferentes características en un copolímero de bloque, se produce otro con características combinadas. En un copolímero aleatorio, monómeros diferente están enlazados en un orden no determinado. Este copolímero se produce con la adición de un comonómero, generalmente etileno y en algunos casos 1-buteno y 1-hexeno, durante la reacción de polimerización en el reactor. El comonómero sustituye parcialmente (1 a 7%) al propileno en el creciente de la cadena. La inserción del comonómero es al azar y su distribución es estadística a lo largo de la cadena. La inserción de etileno disminuye la formación de esferulitas, bajando el porcentaje de zonas cristalinas. La estructura de un PP copolimerizado con distribución en bloque y aleatoria, se muestra esquemáticamente en la Figura 1.9.

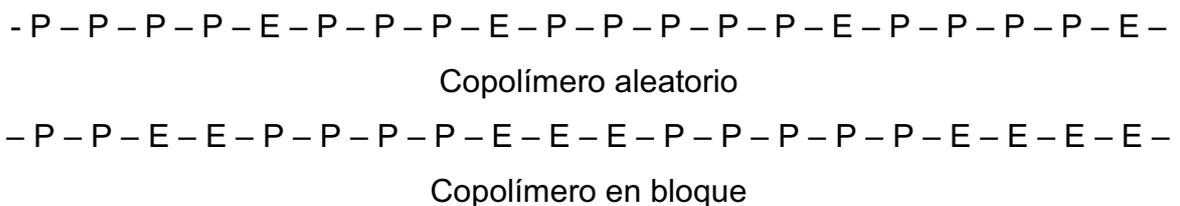


Figura 1.9. Estructura de moléculas de PP copolimerizado con distribución aleatoria y en bloque. P y E representan las unidades monoméricas polipropileno y etileno respectivamente.

1.1.3.4. Estructura

Similar al PE, el PP es un hidrocarburo lineal que contiene muy poca insaturación. Por lo tanto, el PP como el PE tiene propiedades muy similares, particularmente en su comportamiento de solubilidad y en sus propiedades eléctricas. A pesar de tanta similitud, la presencia de un grupo metil unido a átomos de carbono de sustitución en la cadena principal, modifican las propiedades del polímero de muchas formas. Por ejemplo, causa rigidez leve de la cadena polimérica e interfiere con la simetría molecular. El primer efecto produce un incremento en el punto de fusión cristalino mientras que la simetría molecular tiende a descender. Sin embargo, el incremento en el punto de fusión, por la presencia de grupos de sustitución es mucho más alto que el disminución correspondiente a la simetría molecular.

El punto de fusión del PP es de aproximadamente 50°C más alto que el del PE. El punto de fusión del HDPE está entre 120-130°C. El punto de fusión cristalino del PP está entre 160-170°C. Además, debido a la presencia de grupos metil, el PP generalmente tiene una resistencia a la tracción, a la flexión y compresión y, un módulo mucho más alto que el PE. Los grupos metil pueden influir en algunos aspectos del comportamiento químico; por ejemplo, el átomo ternario de carbono da lugar a la oxidación, tanto que el PP es menos estable que el PE a la influencia del oxígeno.

En la Tabla 1.8 se compara las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de dos tipos de polipropileno, utilizados en la EPN para la elaboración de materiales compuestos.

Tabla 1.8 Propiedades de los polipropilenos homopolímeros Braskem PP H301 y Petroquim PP – PH1310. Fuente IDES

Braskem PP - H301			PP – PH1310 Petroquim
Propiedades Físicas			
Densidad	0,905 g/cm ³	ASTM D792	0,905 g/cm ³
MFI (230° C / 2.16 kg)	10 g/ 10 min	ASTM D1238	13 g/ 10 min
Propiedades Mecánicas			
Esfuerzo de fluencia	33 MPa	ASTM D638	3 MPa
Elongación a la fluencia	13%	ASTM D638	12%
Módulo de flexión	1530 MPa	ASTM D790	1500 MPa
Dureza Rockwell R	90	ASTM D785	90
Propiedades Térmicas			
Punto VICAT	153°C	ASTM D1525	154°C

1.1.4. MATERIALES DE REFUERZO

Muchos materiales compuestos fibrosos se obtienen combinando fibras resistentes y frágiles con una matriz polimérica que es más dúctil. Esto se hace con el objetivo de mejorar las propiedades de los polímeros que tienen baja rigidez y son dúctiles en un intervalo de temperaturas y que luego de emplear refuerzos como las fibras los esfuerzos no producirían un fallo repentino, sino progresivo.

En la Figura 1.10 se presenta la curva esfuerzo vs. deformación para un material compuesto. Se tiene una pendiente E hasta que inicia la cedencia de la matriz y a partir de aquí, la mayor parte de la carga adicional es soportada por las fibras, que continúan estirándose elásticamente hasta que se fracturan. Cuando se rompen, el esfuerzo cae hasta el límite elástico de la matriz. Finalmente, se tiene que cuando el material está soportando su esfuerzo máximo, las fibras están el punto de rotura, la matriz ha cedido y falla totalmente cuando se fractura la matriz.

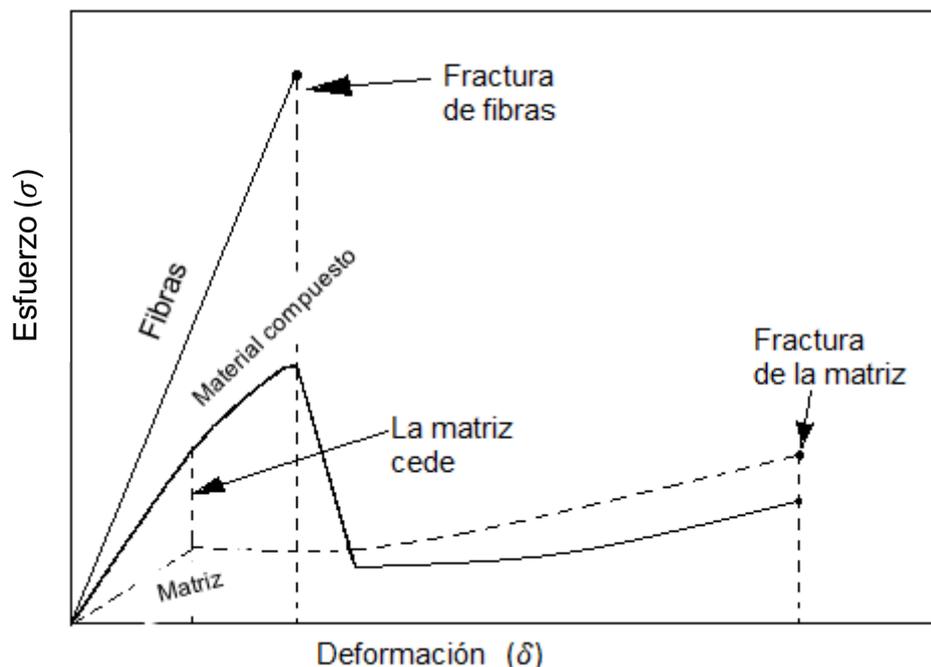


Figura 1.10. Curva tracción vs deformación de un material compuesto con fibras continuas (línea gruesa), mostrando cómo se relaciona con las curvas de las fibras y de la matriz (líneas finas).⁴

⁴ Ashby, M.; Jones, D.; Materiales para ingeniería 2: introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño; Editorial Reverté; Barcelona; 2009.

Los refuerzos en los materiales compuestos lo constituyen los diferentes tipos de fibras que pueden ser naturales o sintéticas. Entre las fibras naturales se pueden mencionar a las fibras naturales, orgánicas e inorgánicas. Por ejemplo, abacá, seda, lana, algodón, yute y sisal. Asimismo, hay una gran variedad de fibras sintéticas disponibles en el mercado. Alambres metálicos o filamentos han estado disponibles hace mucho tiempo. Algunos ejemplos incluyen acero, aluminio, cobre, tungsteno, molibdeno, oro, plata, etc. Entre los cerámicos y la fibra de vidrio, es la fibra de vidrio la que ha estado disponible para reforzar matrices poliméricas desde 1940, mientras que las fibras cerámicas como el carbono, carburo de silicio, alúmina, etc., han estado disponibles desde 1960. Gradualmente, se han usado refuerzos de fibras en elementos de ingeniería, tales como cintas transportadoras, cinturones de seguridad, geotextiles, etc. Con el advenimiento de las fibras de alto módulo de elasticidad, el uso de fibras se ha extendido a los materiales de alta ingeniería, como son los materiales compuestos.

1.1.4.1. REFUERZO DE FIBRAS NATURALES

Los materiales poliméricos reforzados con fibras naturales constituyen un área de estudio nuevo en la ciencia de los polímeros ya que las fibras naturales son biodegradables y no abrasivas. Las fibras naturales son de bajo costo, de fácil obtención y poseen bajas densidades. Además, los materiales compuestos que se obtienen con las fibras naturales ofrecen mejores propiedades mecánicas específicas en relación a los compuestos reforzados con fibras convencionales.

Su campo de aplicación es extenso y va desde artículos para el hogar hasta elementos de la industria aeroespacial. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta ciertos inconvenientes que pudieran presentarse en la fabricación de estos compuestos como son: la incompatibilidad del refuerzo con la matriz polimérica hidrofóbica, la tendencia a formar agregados durante su procesamiento y la baja resistencia a la humedad. Estos factores inciden de forma directa en sus propiedades y limitan su uso potencial como materiales de refuerzo en polímeros.

En cuanto a la microestructura de las fibras naturales se tiene que son fibras de celulosa constituidas de microfibrillas en una matriz amorfa de lignina y

hemicelulosa orientadas a lo largo de las fibras donde su resistencia y rigidez está dada por enlaces de hidrógeno entre otros. De acuerdo a su composición química, se tiene que la hemicelulosa presente en las fibras es la responsable de su biodegradación, absorción de humedad y degradación térmica. La lignina contenida en estas fibras es térmicamente estable pero responsable de la degradación por rayos UV.

Tipos de fibras naturales

Las fibras naturales están agrupadas en tres tipos: fibras de semilla, fibras del tronco y fibras de las hojas. Por ejemplo, el algodón es del tipo fibra de semilla, el yute, lino y ramio que son del tipo fibras de tallo y el sisal y abacá del tipo fibra de hoja. La fibra de abacá es de principal interés en el presente estudio para constatar su comportamiento como refuerzo en materiales compuestos híbridos. En la Tabla 1.9 se muestran las propiedades de las principales fibras naturales de uso industrial y su comparación con la fibra de vidrio. En esta tabla se puede observar como la resistencia de la fibra de vidrio es considerablemente más alta que la de las fibras naturales. Sin embargo, cuando es considerado el módulo específico (módulo de elasticidad / gravedad específica) de las fibras naturales, éstas muestran valores comparables con el de la fibra de vidrio y, constituyen una de las mayores ventajas al momento de elaborar materiales que requieran un peso reducido.

Tabla 1.9. Propiedades mecánicas de las fibras naturales. (Nabi Saheb, 1999)

Fibra	Gravedad específica	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo específico (m²/s²)
Abacá [9]	1,3	1018	28	22
Yute	1,3	393	55	42
Sisal	1,3	510	28	22
Lino	1,5	344	27	18
Cáñamo	1,07	389	35	33
Piña	1,56	170	62	40
Fibra de vidrio	2,5	3400	72	29

Por otra parte, el uso de fibras naturales como refuerzo de materiales poliméricos podría presentar problemas asociados con:

Contenido de humedad en las fibras

Las fibras celulósicas son hidrofílicas y por lo tanto absorben humedad que varía entre el 5 y 10%. El efecto que produce la humedad en el compuesto es que puede variar dimensionalmente. Adicionalmente, en el procesamiento de compuestos de matriz termoplástica la humedad contenida puede generar productos porosos. Sin embargo, las fibras naturales con tratamientos químicos o por injertos de monómeros vinílicos pueden reducir la ganancia de humedad.

Biodegradación y fotodegradación de fibras naturales

Las fibras naturales (lignocelulósicas) se degradan por organismos biológicos debido a que éstos pueden reconocer los polímeros carbohidratados en la pared celular. Además, la lignocelulosa cuando es expuesta a la luz solar se degrada fotoquímicamente debido a la luz ultravioleta. La resistencia a la biodegradación y radiación UV puede mejorarse mediante enlaces químicos a la pared celular de los polímeros o añadiendo polímeros a la matriz celular.

1.1.4.2. FIBRA DE ABACÁ

La fibra de abacá es una fibra dura y presenta diámetros, aspereza y rigidez más grandes que otros tipos de fibras naturales debido a su alto contenido de lignina y se las obtiene a partir de un proceso de descortezación separando mecánicamente la corteza del tallo. 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. Sin embargo, su ventaja radica en la facilidad de procesamiento que presentan y en que permiten obtener mejores propiedades mecánicas. Las fibras de abacá, además de estar ampliamente disponibles en varias formas, representan materias primas renovables.

El abacá es nativa de Filipinas donde ha sido cultivada desde el siglo XVI con similitud a la planta de banano. De su cultivo se obtienen fibras largas que son extraídas desde el pecíolo de las hojas que convergen en la base para formar un

tallo. Se cosecha entre los 18 y los 24 meses después de que ha sido plantada. Para este tiempo la planta de abacá tiene de 4 a 7 metros de alto y se aprecia en la Figura 1.11 [10].



Figura 1.11. Planta de abacá. (André, A., 2006)

Esta planta también ha sido introducida en otros países de Sur y Centro América, entre ellos en Ecuador donde sus condiciones climatológicas son las adecuadas para su cultivo obteniéndose un producto óptimo y de gran calidad en las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas, Manabí, Los Ríos y Cotopaxi. El uso de esta fibra natural contribuye a que el planeta sea más verde y su aporte podría ser mayor con mejores prácticas agrícolas e industriales. Las fibras de abacá son usadas ampliamente para producir sogas, telas tejidas, bolsas de té, etc. Actualmente, entre sus aplicaciones, las fibras de abacá son usadas como protección bajo el piso para pasajeros de autos empleando la combinación de polipropileno (PP) termoplástico reforzado con fibras de abacá y patentado por los investigadores de Daimler Chrysler y con procesos de manufactura (moldeo por compresión) iniciados por Rieter Automotive. [11] Sus propiedades mecánicas se aprecian en la Tabla 1.10.

Tabla 1.10. Propiedades mecánicas de la fibra de abacá calidad 3.⁵

Abacá calidad 3	Deformación (%)	Esfuerzo (kg/mm²)	Módulo (kg/mm²)
Parte inicial	3,877 ± 0,289	78,99 ± 13,95	2149,30 ± 288,13
Parte media	3,849 ± 0,307	128,62 ± 9,84	3441,86 ± 210,03
Parte final	3,315 ± 0,428	126,24 ± 20,43	3840,70 ± 431,48
Promedio	3,680 ± 0,474	111,28 ± 30,17	3143,95 ± 866,45

La caracterización de las fibras de abacá que se realizó en el proyecto de titulación de Morejón y Narváez [2004], indica que el diámetro de las fibras se encuentra en entre 151 y 284 μm para las calidades 2, 3, 4 y 5. Sus propiedades mecánicas y físicas son las siguientes:

Tabla 1.11. Propiedades de la fibra de abacá calidad 3 de acuerdo a estudios realizados en la EPN⁵.

Propiedad	Magnitud
Esfuerzo último a la tracción (MPa)	775 - 1261
Módulo (GPa)	19 - 37
Deformación unitaria (%)	3,10 - 4,27
Absorción de agua (%)	8 - 10
Densidad (g/cm ³)	1,3

Importancia económica del abacá

De acuerdo al último Censo Nacional Agropecuario (III Censo, 2000), la producción del abacá en el Ecuador representó el 0,1% del Producto Interno Bruto (PIB). La producción del abacá en el Ecuador es el sustento de vida de 29652 personas, que corresponden a 7413 familias (incluye 750 propietarios). A lo largo de todo el país, hay 6533 trabajadores diurnos y/o empleados dedicados al mantenimiento y prácticas de cosecha (7 trabajadores por 15 hectáreas). Además, hay 130 trabajadores indirectos, incluyendo vendedores, transportistas y demás personal administrativo en compañías de exportación.

Aproximadamente 14000 hectáreas de tierras de cultivo se usan en la producción de abacá en cinco provincias: Santo Domingo de los Tsáchilas (80%),

⁵MOREJÓN, S; NARVÁEZ, L; Materiales compuestos de matrices polietilénicas reforzados con fibras naturales de abacá y cabuya; Escuela Politécnica Nacional; Quito; 2004.

Esmeraldas, Manabí, Los Ríos y Cotopaxi. En Santo Domingo se encuentra la mayor concentración de familias cuyos trabajos están de alguna forma relacionados con la producción del abacá (5931 familias) [12].

Productividad del abacá

La duración de la plantación depende principalmente de la naturaleza y cuidado del suelo. Se estima que una plantación de abacá tiene un periodo de vida productivo de 15 a 20 años. La producción de fibra seca y limpia está entre el 1,1 al 2% del peso del tallo. El tallo completo pesa en promedio de 50 a 70 kg. De acuerdo a estos datos, se tiene aproximadamente entre 1,1 y 2 toneladas métricas de fibra de abacá producida por hectárea. [12]

Exportaciones

En años recientes, las exportaciones del abacá ecuatoriano en miles de dólares FOB (Free On Board) han fluctuado desde el 2007 al 2012 como se muestra en la Tabla 1.12 en donde se ve que a partir del 2007 las exportaciones de abacá se incrementaron en un 62%, mientras que en el año 2009 éstas se redujeron un 15%. Sin embargo, se observa una normalización de las mismas en los años posteriores, gráficamente se tiene en la Figura 1.12 las fluctuaciones de estas exportaciones para los últimos años.

Tabla 1.12. Exportaciones de abacá. (Banco Central del Ecuador)⁶

Período (año)	Total exportaciones (Ton)	Abacá (Ton)
2007	14321316	9192
2008	18818327	14928
2009	13863058	12888
2010	17489928	13126
2011	22322353	12907
2012 (enero-junio)	12158931	8819

⁶ Banco Central del Ecuador: exportaciones por producto principal
<http://www.bce.fin.ec/docs.php?path=/home1/estadisticas/bolmensual/!EMensual.jsp>

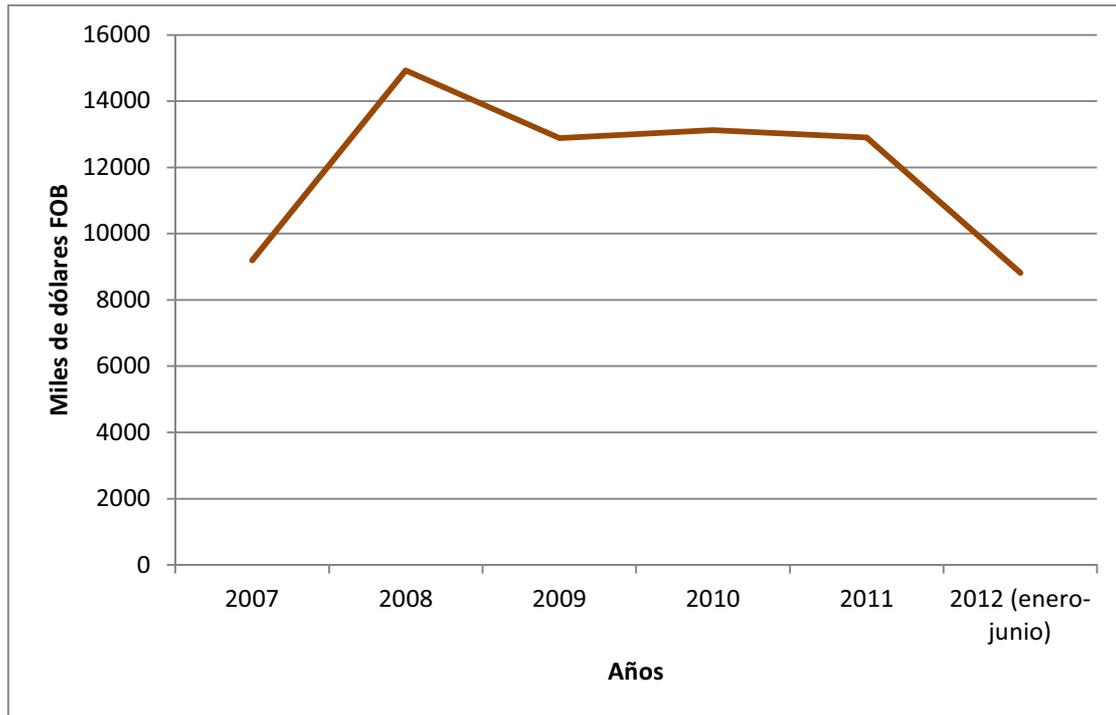


Figura 1.12. Exportaciones de abacá. (Banco Central del Ecuador)

Propiedades de la fibra de abacá

La fibra de abacá tiene una longitud que oscila entre 3 a 5 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 de largo y entre 6 y 46 μm de diámetro. Además, presenta una resistencia a la tracción que oscila entre 430-760 MPa. Cabe indicar que la fibra de abacá es mucho más resistente a la degradación en agua salada que la mayoría de fibras vegetales. Finalmente, se tiene que las fibras de abacá son lignocelulósicas y su composición química es: 70,1% celulosa, 21,8% hemicelulosa, 0,6% pectina, 5,7% lignina [13].

1.1.4.3. FIBRA DE VIDRIO [14]

Existe una gran variedad de materiales vidriosos con la característica común que tienen una estructura no cristalina. Es así, como en teoría se puede producir un material vidrioso a partir de un polímero, metal o cerámico. En esta sección, se describe a las fibras de vidrio orgánicas basadas en sílice debido a gran

importancia comercial como fibra de refuerzo para compuestos de matriz polimérica y como fibra óptica para comunicaciones.

Debido a la característica de estirabilidad de los vidrios, que se deriva de su naturaleza viscoelástica, se pueden producir fibras de vidrio con diámetros muy pequeños a partir de los cuales se hacen arreglos para que funcionen como refuerzo de materiales compuestos.

Proceso de fabricación de fibra de vidrio para refuerzo

Uno de los mercados más grandes para la fibra de vidrio constituye su uso como refuerzo de materiales de matriz polimérica. En la Figura 1.13 se muestra un esquema del proceso de fabricación de la fibra de vidrio, mientras que en la Figura 1.14 se muestra una foto de la fibra de vidrio al momento que es extraída de agujeros en un buje. La materia prima es calentada en una tolva y el vidrio fundido se introduce en bujes de rodio-platino multiagujeros calentados eléctricamente. Generalmente, los casquillos contienen 200 agujeros en la base. El depósito contiene vidrio fundido de manera constante. Este fluye por gravedad a través de los agujeros, formando finos filamentos continuos que están reunidos antes de pasar por un mandril de rotación rápida, a una velocidad de 1-2 km/min. Luego, las fibras que salen del casquillo son enfriadas y se les da un tratamiento superficial (con un aceite de almidón) y un tratamiento de estiramiento en la bobina receptora.

Típicamente, las fibras de vidrio tienen un diámetro entre 5 y 20 μm y están en función del diámetro del orificio del buje y viscosidad que depende de la composición y la temperatura del vidrio en la tolva. La viscosidad está generalmente alrededor de los 100 Pa·s para una buena fiberización.

Las fibras de vidrio sufren daños fácilmente por la introducción de defectos superficiales. Para minimizar esto y facilitar el manejo de estas fibras, el tratamiento superficial protege y une los filamentos en hebras. El factor más importante de controlar es la viscosidad de las fibras de vidrio pudiendo también romperse debido a partículas sin disolver, abrasión, desvitrificación, o cualquier inestabilidad debido a cambios en la viscosidad/velocidad de bobinado.

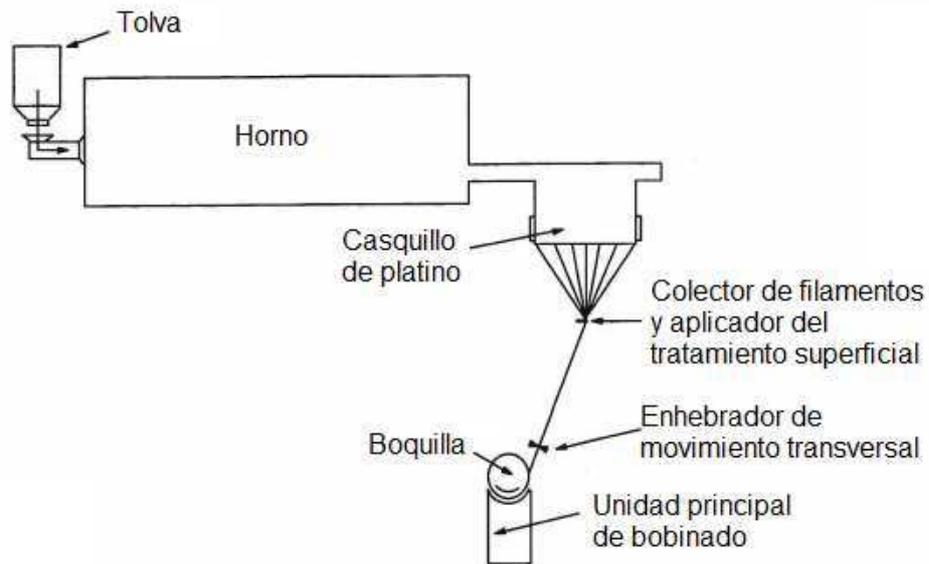


Figura 1.13. Esquema del procedimiento convencional de fabricación de fibra de vidrio.

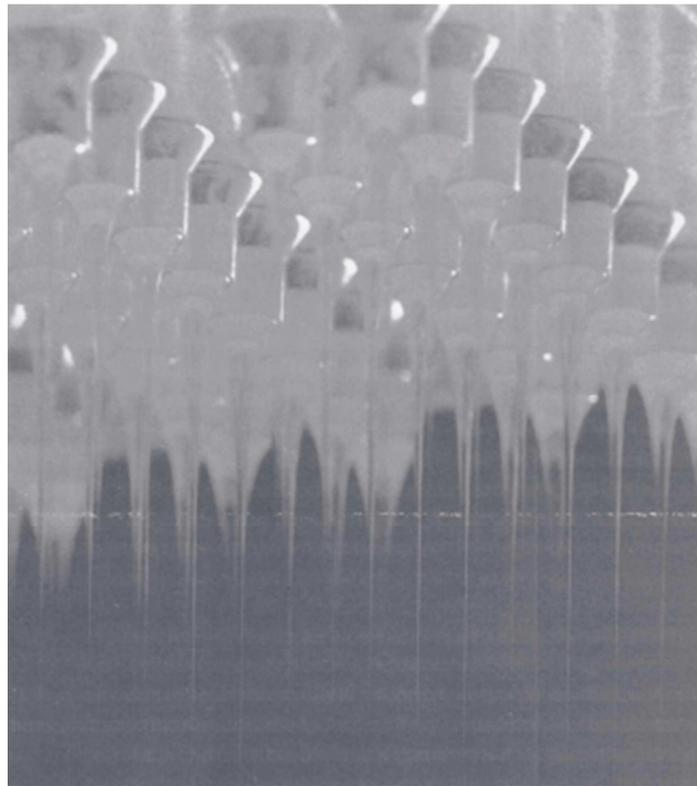


Figura 1.14. Fibras de vidrio siendo extraídas de los agujeros en un buje. (Owen-Corning, Inc.)

Una característica muy importante de la fibra de vidrio es su extrema flexibilidad que se deriva de su diámetro pequeño y bajo módulo. De esta forma se pueden emplear procesos textiles como tejido, tricotado, etc., para fabricar cintas, mangas y cuerdas de fibra de vidrio. La fibra de vidrio E tiene un diámetro entre 3 y 20 μm

y se usa principalmente para propósitos de aislamiento así como también para refuerzo de polímeros. De manera frecuente, las fibras de vidrio son picadas para obtener fibras cortas y en forma de lana de vidrio para aislamientos mediante procesos rotatorios. Un recipiente que contiene vidrio fundido se somete a rotación rápida y las fibras de vidrio surgen luego de hacer girar una serie de cabezas de rotación como resultado de la fuerza centrífuga. Las corrientes emergentes horizontales de vidrio se ven afectadas por las explosiones de los gases de combustión a alta velocidad convirtiendo el vidrio fundido en las fibras cortas. Después se pulveriza aglutinante sobre estas fibras durante su viaje hacia abajo en una cinta transportadora para darles una forma enredada. Finalmente, el aglutinante se cura en un horno y la lana de vidrio es comprimida por los rodillos hasta obtener el espesor deseado.

Composición química

La fibra de vidrio basado en sílice (~50-60% SiO_2) se la encuentra en una variedad de diferentes composiciones químicas y contiene varios óxidos de Ca, B, Na, Al, Fe, etc. Comúnmente se los usa para reforzar polímeros termoestables y termoplásticos. En la Tabla 1.13 se puede ver las composiciones de algunos tipos de fibra de vidrio usados en compuestos. La designación E significa eléctrica como vidrio E es un buen aislante eléctrico además de tener buena resistencia y módulo de Young razonable; C significa corrosión, así el vidrio C tiene una mejor resistencia a corrosión química; S significa alta sílice y el vidrio S es capaz de soportar temperaturas más altas que los otros. Cabe indicar que más del 90% de todas las fibras de vidrio continuas producidas son del tipo vidrio-E.

Tabla 1.13. Composición química de algunas fibras de vidrio comunes. (Chawla, 1998)

Compuesto	Vidrio-E	Vidrio-C	Vidrio-S
SiO_2	55,2	65,0	65,0
Al_2O_3	8,0	4,0	25,0
CaO	18,7	14,0	-
MgO	4,6	3,0	10,0
Na_2O	0,3	8,5	0,3
K_2O	0,2	-	-
Li_2O	7,3	5,0	-

Propiedades

Los vidrios de base silícica generalmente tienen muy baja densidad. La resistencia puede ser alta, pero su módulo elástico es bajo. Así, mientras la relación resistencia/peso de la fibra de vidrio es bastante alta, la relación módulo/peso es moderada. Las propiedades mecánicas típicas de diferentes fibras de vidrio se resumen en la Tabla 1.14.

Aunque la resistencia al fuego y a muchos químicos son características muy atractivas del vidrio, la humedad puede reducir la resistencia de la fibra de vidrio. En particular, la absorción de la humedad de la fibra de vidrio recién elaborada resulta en un drástico decremento en su resistencia. La fibra de vidrio es también susceptible a lo que se conoce como *fatiga estática*, por ejemplo, no puede soportar cargas por largos periodos de tiempo.

La fibra de vidrio más común como es la del tipo E se corroe severamente en un ambiente alcalino como en el cemento o concreto. Sin embargo, algunas fibras de vidrio especiales alcalino-resistentes han sido desarrolladas. Esta fibra especial se llama Cemfil y sus propiedades se observan en la Tabla 1.14.

Tabla 1.14. Propiedades mecánicas de algunas fibras de vidrio. (Chawla, 1998)

Tipo de fibra de vidrio	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tracción (GPa)	Módulo de Young (GPa)
E	2,54	1,7-3,5	69-72
S	2,48	2,0-4,5	85
C	2,48	1,7-2,8	70
Cemfil	2,70	-	80

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 1.15 ilustra la variación de propiedades mecánicas en diferentes tipos de compuestos reforzados con fibra de vidrio.

Tabla 1.15. Propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio en distintas configuraciones y cantidades. [Hollaway, 1994]

Fibra de vidrio de refuerzo	CSM (PB)	WR	Tejido satín	SMC
Resina	Orto poliéster	Iso poliéster	Iso poliéster	Iso poliéster
Curado	16 h 40°C	16 h 40°C	28 días temp. ambiente	Curado en caliente
Fración 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	-
Dirección del esfuerzo	-	0°/90°	0°/90°	-
Propiedad				
Gravedad específica	1,46	1,70	1,70	1,87
Resistencia a la tracción (MPa)	110	220	260	70
Módulo de elasticidad (GPa)	8	14	17	10
Elongación a la ruptura (%)	1,6	1,7	-	1,4
Relación de Poisson a tracción	0,32	0,14	0,17	-
Resistencia a la compresión (MPa)	150	230	210	120
Resistencia a la flexión (MPa)	190	270	480	140
Módulo a la flexión (GPa)	7	14	17	8
Resistencia al corte (MPa)	80	90	70	70
Energía de impacto Charpy (kJ/m ²) (sin muesca)	-	-	-	60

Aplicaciones

La fibra de vidrio está disponible en una variedad de formas y presentaciones como se aprecia en la Figura 1.15. Algunas de las más importantes incluyen: fibra continua y mechada, fibras cortadas y mat de hilos cortados. Las fibras cortadas son hebras de filamentos individuales de 200 a 400 mm de largo y son excelentes para proporcionar volumen. Los hilos cortados de fibra de vidrio constan de varias fibras picadas en varias longitudes, de 3 mm a 50 mm, principalmente con el propósito de mezclar con una resina para hacer compuestos. Los mats de fibra de vidrio consisten en fibras cortadas y dispersas de forma aleatoria o filamentos continuos de fibras unidos con una resina.

La fibra de vidrio encuentra aplicación en una amplia gama de mercados:

- Partes de aviones y demás vehículos aeroespaciales
- En la marina: cascos y cubiertas de barcos de pesca comerciales
- Construcciones civiles, como en paneles, tinas, pedestales de duchas, puertas, ventanas, etc. Además, en domos y como refuerzo del concreto
- Aislamiento térmico y acústico y para propósitos de filtrado.

- Bienes deportivos
- Mercado eléctrico-electrónico
- Comunicaciones ópticas
- Fibra óptica en el campo de la medicina

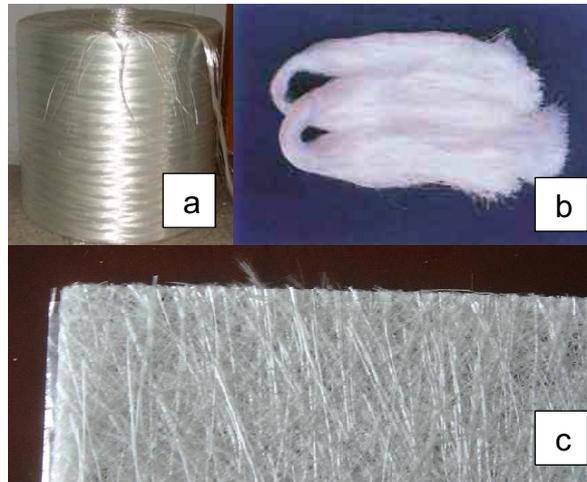


Figura 1.15. Presentaciones más usuales de la fibra de vidrio: (a) fibra continua y mechada; (b) fibras cortadas; (c) mat de fibra de vidrio.

A pesar de las ventajas que ofrece el uso de fibra de vidrio como refuerzo en materiales compuestos, las políticas medioambientales exigen cada vez más el uso de materiales provenientes de recursos renovables y, que a la vez permitan reducir el consumo de los materiales poliméricos convencionales. Por ello, las fibras naturales debido a sus excelentes propiedades mecánicas, constituyen una alternativa viable al uso de refuerzos como la fibra de vidrio.

1.1.4.4. INTERFAZ FIBRA-MATRIZ

La incorporación de fibras naturales hidrofílicas en un polímero conduce a la creación de sistemas heterogéneos con propiedades inferiores si se presenta poca o ninguna adhesión entre las fibras y la matriz. Es por esto, que el tratamiento de las fibras puede mejorar la adhesión en el desarrollo de tales compuestos. Los tratamientos que se pueden aplicar a las fibras son: blanqueo, injerto de monómeros, acetilación, etc. Además, se pueden emplear compatibilizadores o algún agente de acoplamiento para transferir efectivamente los esfuerzos a través de la interfaz. Los compatibilizadores pueden ser polímeros con grupos funcionales injertos en la cadena del polímero. Los agentes de

acoplamiento son compuestos tetrafuncionales organometálicos basados en silicón, titanio y zirconio [15].

El grado de impregnabilidad o mojado es la capacidad que tiene la matriz en estado líquido para extenderse sobre una superficie sólida, que en este caso será el refuerzo. Dependiendo de la capacidad de mojabilidad de la matriz, la interfaz va a generar las propiedades del material. Por lo tanto, la unión de los constituyentes de un material compuesto puede ser: (i) unión electrostática, (ii) unión química, (iii) unión mediante interdifusión y (iv) unión mecánica.

La forma en que se da la unión entre fibra y matriz por adhesión mecánica se produce puramente por la inter-penetración mecánica de dos superficies como se ilustra en la Figura 1.16. Una resina que moje completamente la superficie de la fibra seguirá cada detalle de esta superficie. La resistencia de esta interfaz a tracción probablemente no será alta a menos que haya un gran número de entrantes y salientes en la superficie de la fibra. La resistencia al corte puede ser muy significativa y dependerá del grado de rugosidad. Un factor bien distinto que también está relacionado con la rugosidad de la superficie de la fibra es la posibilidad de incrementar la fuerza de unión a través de, por ejemplo, una unión química a causa de la mayor área de la superficie que está disponible.

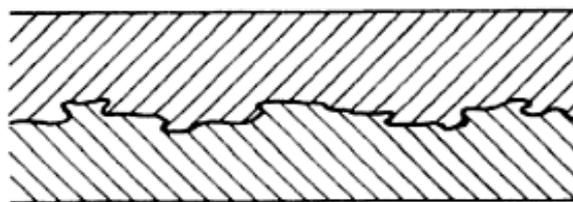


Figura 1.16. Unión mecánica formada cuando un polímero líquido moja una superficie sólida rugosa. (Hull, 2003)

Además de los aspectos geométricos simples de la adhesión mecánica, hay muchos esfuerzos internos en un material compuesto que se desarrollan durante las operaciones de procesado y el ensayo mecánico, que afectan la resistencia aparente de la unión fibra-matriz. Así, por ejemplo, la contracción de la resina durante el curado de los polímeros termoestables y la dilatación térmica

diferencial de la matriz y de las fibras pueden producir esfuerzos de tracción, de compresión y de cortadura en la interfase, dependiendo de la geometría de las fibras y de la pieza [16].

La fibra de vidrio comercial usada en refuerzo de compuestos es casi siempre tratada con un agente de acoplamiento, que es capaz de interactuar con la resina polimérica. Este agente no solo se asegura de que las propiedades del compuesto permanezcan relativamente intactas bajo efectos de humedad, sino que también reduce el esfuerzo en la interfaz durante el ciclo térmico. Los trialkoxisilanos, que contienen grupos orgánicos compatibles con la resina polimérica, son los agente de acoplamiento que se usan comúnmente. Los efectos de estos agentes de compatibilización en compuestos termoplásticos con refuerzo de fibra celulósica y su influencia en las propiedades mecánicas se han reportado. Singht et al. [17] reportaron los efectos de varios tratamientos químicos como el organotitanato, zirconato, silano y metacrilamida N-sustituída en las propiedades de compuestos de poliéster reforzados con fibras de sisal. Los refuerzos a las fibras pueden ser modificadas por métodos físicos y químicos.

1.2. COMPUESTOS HÍBRIDOS

Los compuestos híbridos se caracterizan porque presentan dos o más tipos de fibra en una matriz común. En años recientes ha habido un gran interés en tales materiales, particularmente en aquellos basados en una combinación de fibra de vidrio y una natural y más económica como la fibra de abacá. Este interés se basa en la idea de reducir el impacto ambiental que puede tener un material compuesto solo con fibra de vidrio al reemplazarla en parte con la fibra natural de abacá. Además, hay evidencia de que una estructura híbrida ofrecerá una combinación más atractiva de propiedades, por ejemplo, rigidez y tenacidad, que compuestos basados en un solo tipo de fibra.

1.2.1. DEFINICIÓN, PROPIEDADES Y APLICACIONES

Los híbridos son formas de materiales que hacen uso de dos o más tipos de fibras. Híbridos comunes incluyen fibras como: vidrio/carbón, vidrio/aramida y

aramida/carbón. Los híbridos son usados para aprovechar las propiedades y características de cada tipo de refuerzo. El término efecto híbrido ha sido usado para describir el fenómeno de un aparente mejoramiento sinérgico en las propiedades de un compuesto que contiene dos o más tipos de fibras. La selección de los componentes que generan el compuesto híbrido es determinada por el propósito de la hibridación y los requerimientos impuestos al material a ser diseñado. El problema principal cuando se diseñan y producen compuestos híbridos es la selección del tipo de fibras compatibles y el nivel de sus propiedades. De manera similar, el uso exitoso de compuestos híbridos es determinado por la estabilidad química, mecánica y física del sistema fibra / matriz [18].

Existen varios tipos de compuestos híbridos caracterizados por la disposición del refuerzo como: (1) intracapas (presentes en una capa) en los que las hileras de dos o más tipos de constituyentes están mezclados de manera regular o aleatoria; (2) híbridos sánduche, también conocidos como núcleo-corteza, en el cual un material está dispuesto a manera de sánduche entre dos capas del otro; (3) intercapas (presentes en dos capas) o laminados, donde capas alternadas de dos o más materiales están apilados de manera regular; (4) híbridos mezclados íntimamente, donde las fibras constituyentes se encuentran mezcladas de la forma más aleatoria posible con el fin de evitar la sobre concentración de un solo tipo en el material y otros tipos, como aquellos reforzados con nervaduras, cables pultrusionados, velos delgados o combinación de los mencionados anteriormente. Por ejemplo, se tiene que los híbridos intercapas vidrio/carbón pueden ser usados para prevenir la corrosión galvánica del aluminio por el carbón. Por otro lado, también puede ocurrir hibridación en áreas seleccionadas, usualmente para localizar resistencia o rigidez en un elemento mecánico. Los híbridos de carbón/vidrio-E tienen mejores propiedades físicas y mecánicas que los compuestos que presentan como único refuerzo solo vidrio-E.

Las propiedades de un compuesto híbrido dependen mayormente del contenido de la fibra, la longitud de las fibras individuales, la orientación, el grado de entremezcla de las fibras, la interfaz fibra matriz, entre otras. La resistencia del compuesto híbrido también depende de la tensión de falla de las fibras

individuales. Los máximos resultados híbridos son obtenidos cuando las fibras son compatibles. Las propiedades de los sistemas híbridos de dos componentes, pueden predecirse por las reglas de las mezclas.

$$P_H = P_1V_1 + P_2V_2 \quad 1$$

$$V_1 + V_2 = 1 \quad 2$$

Donde P_H es la propiedad a ser investigada, P_1 es la correspondiente propiedad del primer sistema y P_2 es la correspondiente propiedad del segundo sistema. V_1 y V_2 son las relativas fracciones de volumen híbrido del primer y segundo sistema .

Un efecto híbrido positivo o negativo es definido con una desviación positiva o negativa de cierta propiedad mecánica a partir de la regla de la mezcla híbrida [19].

Los materiales compuestos híbridos con fibras naturales y matriz tienen ciertas aplicaciones en: componentes automovilísticos, especialmente puertas, paneles de cubierta y en productos de construcción, tales como cubiertas, revestimientos, techos, fenestración y carpintería. Algunos compuestos híbridos como fibra de carbono / siliciuro, tienen alta resistencia, rápido procesamiento, resistencia térmica extrema, químicamente inerte y biocompatible, lo conducen a un amplio rango de aplicaciones en industria aeroespacial y en la medicina [20]. La hibridación con fibra de vidrio provee un método para mejorar las propiedades mecánicas de compuestos de fibra natural. Se ha demostrado también que las propiedades de compuestos híbridos particulados son inferiores a aquellas de plásticos reforzados con fibras de vidrio [17].

1.2.2. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO

A continuación se examinarán las ventajas potenciales de los compuestos híbridos reforzados con matriz termoplástica y sus características de procesamiento.

1.2.2.1. PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS

Los termoplásticos son polímeros con un alto peso molecular que reaccionan completamente luego de su procesamiento. Se derriten y fluyen durante su

procesamiento pero no forman reacciones reticuladas. Por esto, los termoplásticos pueden ser reprocesados; por ejemplo, pueden someterse a procesos de termoformado en perfiles estructurales con solo recalentarlos a la temperatura de procesamiento. Sin embargo, hay un límite para el número de veces que un termoplástico puede reprocesarse y se debe a que las temperaturas de procesamiento están cercanas a las temperaturas de degradación del polímero por lo que al reprocesarlo eventualmente se degradaría el polipropileno o incluso podría reticular.

Debido a que los termoplásticos no experimentan reacciones químicas durante el curado, el procesamiento de estos materiales es teóricamente simple y rápido. Los termoplásticos pueden consolidarse y termoformarse en minutos. Los compuestos termoplásticos tienen la ventaja de que su manejo es seguro para la salud porque estos materiales ya han reaccionado completamente y no presentan un peligro para el trabajador. Su vida útil es esencialmente infinita pero puede requerir secado para remover la humedad luego de su procesamiento.

Debido a que los termoplásticos pueden ser reprocesados con simplemente calentarlos por encima de su temperatura de fusión, éstos ofrecen ventajas en aplicaciones de formado y juntas. Por ejemplo, láminas planas de compuesto termoplástico pueden consolidarse con presión o en autoclave, cortarles pequeños espacio en blanco y luego termoformarlos en formas estructurales. La naturaleza de fusión de los termoplásticos también ofrece un número atractivo de uniones como fusión por calentamiento, soldadura por resistencia, ultrasonido e inducción adicionales a la fijación mecánica convencional por unión adhesiva.

1.2.2.2. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS COMERCIALES

Existen varios procesos importantes en la fabricación de compuestos que se usan ampliamente en el mercado comercial. Entre ellos se tienen los siguientes: termoformado, estratificación de compuestos (lay-up), moldeo por compresión, moldeo por inyección, moldeo por inyección reacción (RIM) y pultrusión. Algunos de estos procesos son capaces de producir más de un millón de partes por año

mientras que otros presentan tasas más bajas de producción y pueden elaborarse materiales que contengan fibras cortas o continuas de refuerzo.

Termoformado

Una de las principales ventajas de los compuestos de matriz termoplástica es su capacidad para ser procesadas rápidamente en formas estructurales por termoformado. Este término abarca un amplio rango de métodos de manufactura pero es esencialmente un proceso que emplea calor y presión para formar una lámina plana o formas estructurales. Un proceso típico de termoformado para una parte termoplástica que se fusione se muestra esquemáticamente en la Figura 1.17 .

El proceso de termoformado consiste en: (1) apilamiento de las capas, (2) presión para consolidar el material, (3) ubicación de las láminas en una segunda prensa para enfriar, (4) desbastar la lámina a una forma requerida, (5) recalentamiento de la pieza por sobre su temperatura de fusión y transporte rápido hacia la prensa que contiene la matriz de la forma deseada. La pieza debe permanecer con presión hasta que se enfríe por debajo de su T_g para evitar inducir esfuerzos residuales y deformaciones.

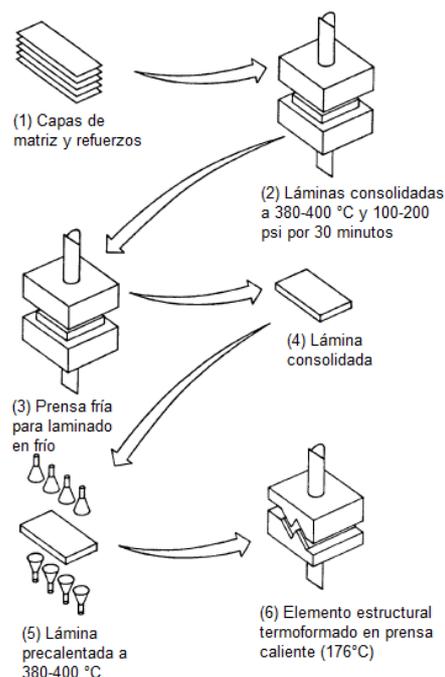


Figura 1.17. Secuencia típica de termoformado. (Campbell, 2004)

Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un proceso de alto volumen y alta presión, perfecto para moldear partes reforzadas con fibra de vidrio de alta resistencia usando ya sea resinas termoplásticas o termoestables. El moldeo por compresión es un proceso que puede producir partes relativamente grandes con excelente acabado superficial, buen control dimensional y alto grado de complejidad. El volumen de partes que generalmente se pueden obtener es de al menos 1000 partes por año, pero típicamente se encuentra alrededor de las 100000 partes por año que justificarían la inversión en equipos y herramientas.

Proceso de moldeo para matriz termoplástica reforzada con mat de vidrio (GMT)

Los compuestos de matriz termoplástica reforzados con mat de vidrio (GMT) consisten en un termoplástico, usualmente polipropileno, que fluye hacia un molde durante un ciclo de moldeo por compresión. La línea de fabricación típica GMT se muestra en la Figura 1.18. Este proceso es ampliamente considerado en el mercado automovilístico debido a la automatización empleada y a los cortos ciclos de procesamiento, tan cortos como 30 s; sin embargo algunas veces se requieren tiempos más largos para obtener la cantidad adecuada de cristalinidad. En este proceso se hace uso de dobles bandas transportadoras donde el material es luego calentado en recipientes móviles usando calentadores infrarrojos a 315°C de 2-3 minutos. Luego es insertado en una prensa hidráulica de alta velocidad con un molde calentado a 135°C y consolidado bajo una presión de 1000-4000 psig. Por lo general, se emplea un ciclo de presurización de dos fases; en la primera, la presión es aplicada rápidamente (5-12 m/min) seguida de una fase más lenta de 25-250 mm/min para permitir que el material tenga tiempo de fluir y llenar el molde [18].

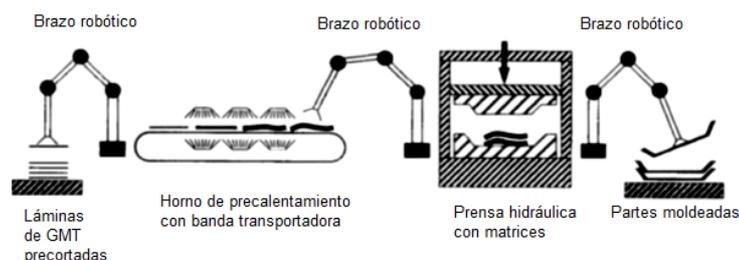


Figura 1.18. Fabricación automática de partes GMT. (Campbell, 2004)

La calidad de las partes finales depende de la atención cuidadosa de varios factores, entre ellos:

Configuración de la placa de material compuesto: debe estar cortada al tamaño del molde y configurado a la geometría de la parte; posicionada en el centro del molde para permitir un flujo regular; no debería estar doblada; con guías y diseñada para fluir, por ejemplo, sin remordeduras en las paredes laterales del molde.

Calentamiento: no se debe calentar la superficie del panel de material compuesto a más de 230°C para el polipropileno; la temperatura interna del panel debe estar entre 190°C y 215°C. Transferirlo de manera rápida al molde para prevenir el enfriamiento.

Aplicación de presión: es importante para mantener una alta tasa de compresión (30 mm/s), de otro modo resultarán en partes incompletas.

Se debería utilizar un sistema robusto de guías para prevenir el desgaste de los bordes de sellado y bloques de parada de emergencia para prevenir que las dos mitades del molde cierren una contra la otra. Los bloques de parada no son usados para determinar el espesor del elemento a obtener pero normalmente se configuran a 0.5 mm por debajo del mínimo del espesor del elemento. Las temperaturas del molde deberán permanecer constantes a 40-70°C usando un cuidadoso sistema de enfriamiento. El objetivo es mantener una distribución de temperatura uniforme a lo largo de la superficie del molde [21].

Se deberían usar pines eyectores para extraer el elemento por igual, en algunos casos desde ambas mitades del molde. Para facilitar el flujo y la eyección la superficie del molde debería ser altamente pulida. Este tipo de moldeo por compresión causa muy poco desgaste, por lo que endurecer la superficie del molde no es necesario excepto cerca de los bordes.

Los moldes de producción son hechos generalmente a partir de acero templado con dureza media. Si no se requiere de altos volúmenes, el endurecimiento no es necesario. Las herramientas para hacer prototipos pueden hacerse de una variedad de materiales tales como Kirksite o aluminio. Para este fin, se pueden

omitir los canales de enfriamiento, así como también el sistema eyector y el pulido de las superficies no es necesario. Esta técnica de procesamiento es una tecnología desarrollada principalmente para obtener altos volúmenes de producción de partes automotrices semi-estructurales.

1.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS HÍBRIDOS

1.3.1. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Luego de obtener un compuesto híbrido mediante moldeo por compresión en una configuración tipo sánduche, es necesario evaluar sus propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas que se determinan para este nuevo material son: resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, resistencia al impacto, módulo de elasticidad a tracción, módulo de elasticidad a flexión, deformación y densidad.

Para el ensayo de tracción se emplea una máquina universal de ensayos que, mediante un extensómetro registra datos de extensión de las probetas para una fuerza dada. Se ensayan 5 probetas elaboradas con la misma configuración de refuerzo híbrido, las cuales deben cumplir la norma ASTM D 3039/3039M. Además, la máquina de ensayos registra la fuerza máxima que resiste la probeta de material compuesto híbrido y la máxima elongación de la misma. Los detalles de este y los demás métodos de ensayo se encuentran más adelante en el apartado 2.5.

Para el ensayo de flexión se utiliza la misma máquina universal de ensayos en la cual se adapta un dado a flexión a tres puntos. Los datos de deformación de la probeta los registra la máquina tomando en cuenta el desplazamiento que tiene su cabezal móvil. El total de probetas ensayadas a flexión para cada configuración de refuerzo es 5 y están elaboradas de acuerdo a la norma ASTM D 7264/D 7264M-07.

En tercer lugar, se tiene el ensayo de impacto el cual se lo realiza en la máquina de ensayo de impacto. Las probetas que se ensayan en esta máquina están elaboradas bajo norma ASTM D 256-10 y el procedimiento a seguir para el ensayo se encuentra en la misma norma.

Para determinar la densidad del material compuesto con una configuración de refuerzo híbrido, se emplean las probetas de flexión que presentan dimensiones que facilitan la toma de datos de sus medidas y pesos para finalmente realizar el cálculo respectivo que servirá para obtener su densidad.

1.3.2. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

La evaluación del prototipo requiere el uso de la norma NOCSAE DOC (ND) 090 – 06m07 (Método de ensayo y especificación normalizado de desempeño para canilleras de fútbol de nueva fabricación), la cual se guía en la norma ASTM 1446 (Métodos de ensayo normalizado para equipo y procedimientos utilizados en la evaluación de desempeño de cascos protectores). La norma establece los procedimientos para la caracterización de las canilleras, sus parámetros y las herramientas para la ejecución del ensayo. La norma establece que se deben ensayar 3 canilleras elaboradas con el material compuesto híbrido que luego de impactarlas permite determinar visualmente el efecto que tuvo en el prototipo. Finalmente, se compara con el modelo original que también se somete al impactador en condiciones de caída libre.

1.3.3. EVALUACIÓN FÍSICA Y ESTRUCTURAL

La evaluación física y estructural del material compuesto híbrido se realiza por medio de microscopía electrónica de barrido. El comportamiento mecánico del material en estudio está directamente relacionado con la interfaz entre las fibras y la matriz. Las imágenes obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido se usan para analizar si se tiene una correcta interfaz entre la fibra y la matriz. Esto se logra al observar el comportamiento frágil que aparece en estos materiales cuando han sido sometidos a esfuerzos de tracción, flexión e impacto. La herramienta empleada en el estudio del compuesto híbrido es el Microscopio Electrónico de Barrido con Espectrometría de Energía Dispersa (MEB-EDX) marca ASPEX, modelo ExpresSem.

El microscopio electrónico de barrido (MEB) emplea un cañón de electrones (donde se genera el haz de electrones), lentes condensadores y un sistema de

vacío. El MEB, es una de las técnicas modernas de caracterización que permite conocer el tamaño y la morfología de un sinnúmero de materiales.

En el microscopio electrónico de barrido, el haz electrónico atraviesa la columna y llega a la muestra. Un generador de barrido es el responsable de producir el movimiento del haz, de manera que barra la muestra punto a punto. De la interacción entre los electrones incidentes con los átomos que componen la muestra se generan señales, las cuales pueden ser captadas con detectores adecuados para cada una de ellas. El detector capta una señal y las convierte en una señal electrónica que es proyectada en un monitor digital.

Mediante microscopía electrónica de barrido es posible conocer:

- Morfología superficial de minerales, catalizadores, etc.
- Electrodepósitos
- Adherencia fibra-matriz en polímeros.
- Cambios morfológicos de materiales sometidos a tratamientos químicos.
- Formas de cristalización de minerales.
- Control de calidad de catalizadores industriales.
- Morfología superficial interna de partículas poliméricas.
- Morfología de tejidos u órganos animales y vegetales.
- Estudio de moléculas
- Reconocimiento de fósiles [22].

1.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS EN LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Varios estudios se han realizado en el campo de los materiales compuestos en la Escuela Politécnica Nacional con la utilización de fibras naturales centrados en el desarrollo y aplicación de los materiales mencionados. A continuación, se da a conocer los aspectos principales de cuatro estudios disponibles en el repositorio digital de la Escuela Politécnica Nacional.

En el estudio realizado por A. Salas se presenta la metodología para obtener compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión. En este trabajo se formularon compuestos con fibras cortas de 10, 20

y 30 mm de largo distribuidas al azar y compuestos con fibras continuas unidireccionales y en tejidos bidimensionales. Las probetas elaboradas fueron sometidas a ensayos de tracción (Norma ASTM D-638) y flexión (Norma ASTM D-5943), absorción de agua (ASAE MB04-305), densidad (ASTM D-792) y dureza (ASTM D-2240). Los resultados de su caracterización mecánica fueron los siguientes: en lo referente al módulo de elasticidad a tracción, los compuestos con 25% y 35% de fracción másica de fibra presentaron valores de 4 y 5 veces mayores que la matriz (307 y 399 MPa, respectivamente). Por otro lado, el esfuerzo máximo de estas configuraciones fue bajo (7 y 11 MPa, respectivamente) con valores similares al del polietileno [23].

El trabajo realizado por H. Villacís, titulado “Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz termoestable reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación”, reveló que una fracción volumétrica de refuerzo de 0,2 provee las mejores propiedades mecánicas al material. La formulación con la mejor combinación de propiedades fue la del 75% de fibra continua unidireccional de abacá y 25% fibra de vidrio. Con esta configuración se obtuvo una resistencia a la tracción de 138 MPa y un módulo de elasticidad de aproximadamente 473 MPa, lo cual equivale a un incremento del 150% y 270% con respecto a la matriz. A flexión, el esfuerzo y módulo registrados fueron de 127 y 5091 MPa, respectivamente. Estos valores corresponden a un aumento del 113 y 122% con relación a la matriz pura. Finalmente, se registró una resistencia al impacto mayor a la matriz en un 614% [24].

La obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural realizada por S. Ponce, se observó un incremento en las propiedades mecánicas del compuesto respecto a su matriz de ácido poliláctico (PLA), cuando el refuerzo fue del 20 vol% de fibra continua unidireccional de abacá. Este incremento es del orden del 165% en la resistencia a la tracción (132 MPa) y de 130% en el módulo de elasticidad (9223 MPa). En cuanto a la resistencia a la flexión (104 MPa) y en el módulo de flexión (5570 MPa) se tuvieron incrementos de 50 y 100% respectivamente. La resistencia al impacto registrada corresponde al 200% respecto a las propiedades de la matriz PLA [25].

A. Tamayo, en su trabajo de titulación: “Obtención de materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación”, realizado en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN, reportó que existe una gran diferencia en las propiedades mecánicas del compuesto al compararlo con otros compuestos similares y son inferiores tanto a tracción, flexión e impacto en comparación con otros compuestos. Sin embargo, destacó la facilidad de fabricación debido a que el hilo y el tejido de cabuya están disponibles en el mercado local y no se necesita procesarlos para introducirlos como refuerzo. El nuevo material con fracción volumétrica de 0,34 y curado de 16 horas a 40°C es el que presentó las mejores propiedades a tracción con un valor de esfuerzo máximo de 61 MPa, que corresponde a un aumento del 112% y un módulo de elasticidad de 6509 MPa (337%) con respecto al poliéster. El mayor esfuerzo máximo a flexión que registró fue de 69 MPa para el material reforzado con 0,30 de fracción volumétrica orientado a 45°. A impacto, el material reforzado con fracción volumétrica de 0,26, absorbió una energía de 0,15 J que corresponde a un incremento del 114% con respecto al poliéster.

1.3.5. RESULTADOS OBTENIDOS DE COMPUESTOS HÍBRIDO EN TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

Existen varios estudios realizados en el campo de los materiales compuestos híbridos que utilizan diferentes tipos de refuerzo de fibras naturales como cáscara de trigo, kenaf, coco, yute, betel, caña de azúcar, sisal, etc., que se combinan en una matriz polimérica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de siete compuestos híbridos, los mismos que serán comparados más adelante en el capítulo 3 con el compuesto obtenido en el presente proyecto.

En el trabajo realizado por Pradeep Upadhyaya (2012) sobre compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzado con partículas de madera y cascara de trigo, con refuerzo 30 y 40 vol%. Se evaluaron las siguientes propiedades mecánicas: resistencia y módulo a la tracción de acuerdo a la norma ASTM D638, resistencia y módulo a la flexión utilizando la norma ASTM D790 y ensayo de impacto IZOD con la norma ASTM D256. la resistencia y módulo de elasticidad a

tracción fueron de 30 y 1809 MPa, respectivamente. A flexión se registraron una resistencia y módulo de elasticidad de 38 y 1324 MPa, respectivamente. Para el caso de impacto el material obtuvo una energía de absorción de 62 J/m [26].

En el estudio realizado por Jeyanthi S. acerca de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzados al 65 vol% con fibras de kenaf /vidrio en proporción 25/40%. Aquí se realizaron los ensayos de: tracción, flexión e impacto con las normas ASTM D3039, ASTM D790, ASTM D256, respectivamente. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes: resistencia a tracción de 135 MPa y un modulo de elasticidad de 7500 MPa, resistencia a flexión de 170 MPa con módulo de elasticidad de 7900 MPa y su energía al impacto fue de 150 J/m [27].

Jayabal S. en su estudio sobre el efecto de la secuencia de apilamiento de capas de refuerzo híbrido de fibras de coco/Vibrio en compuestos de matriz poliéster, determinó que las propiedades mecánicas de estos materiales mejoran cuando las capas de refuerzo se colocan en este orden: vidrio/coco/vidrio, se obtiene propiedades mecánicas de resistencia a la tracción de 47 MPa con un modulo de elasticidad de 1453 MPA, resistencia a la flexión de 65 MPa con módulo de elasticidad de 2881 MPa y resistencia al impacto 101 kJ/m², las normas utilizadas para caracterizar los compuestos híbridos a tracción, flexión e impacto estuvieron de acuerdo a las normas ASTM D638, ASTM D790, ASTM D256, respectivamente [28].

En el trabajo de investigación sobre los efectos del tamaño de fibra del bagazo de la palma (OPFB) en las propiedades mecánicas de compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzados con nanocompuestos de arcillas y bagazo de palma llevado a cabo por Anizha Kalam, 2010. Este polímero híbrido nanocompuestos fue preparado con un refuerzo del 20 vol% del bagazo de palma y nanocompuestos de arcilla y polipropileno mediante moldeado por inyección para luego caracterizarlos a tracción y flexión e impacto. Los ensayo de tracción y flexión se llevaron a cabo de acuerdo a las normas ASTM D638 y ASTM D790, respectivamente, mientras que los ensayos de impacto se realizaron con la norma ASTM D256. Los mejores resultados que se obtuvieron a tracción fueron:

resistencia máxima de 32 MPa y módulo de 3000 MPa. La resistencia al impacto registrada fue de 1.7 kJ/m² y su resistencia y módulo de elasticidad a flexión que presentaron fueron 64 y 3900 MPa, respectivamente [29].

En el estudio del desempeño de materiales compuestos de polipropileno con refuerzo híbrido de yute y fibra de nuez de betel llevado a cabo por M. Masudul Hassan en la Universidad Nacional de Bangladesh, se realizaron probetas del material reforzado a diferentes proporciones de contenido de fibra: 3, 5, 10 y 20 vol% con las siguientes proporciones de refuerzo yute-betel de: 10:5, 10:10 y 10:15 vol% empleando la técnica de moldeo por compresión. En estos compuestos, se investigaron las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto de acuerdo a las normas ASTM D 53455, ASTM D 53452 y ASTM D 53433. Los mejores resultados que se obtuvieron con estos ensayos fueron: esfuerzo y módulo de tracción 170 y 2700 MPa, respectivamente con una proporción de refuerzo híbrido yute/betel 10/10%. La resistencia a la flexión fue de 70 MPa y la resistencia al impacto fue 2.6 kJ/mm² con la misma cantidad de refuerzo híbrido [30].

Las propiedades mecánicas de los compuestos termoestables de matriz epóxica con refuerzo híbrido de yute/bagazo de caña de azúcar fueron estudiadas por Sudhir Kumar Saw para evaluar que efectos tienen diferentes interacciones fibra/matriz. Para esto se llevaron a cabo ensayos de tracción, flexión e impacto bajo normas ASTM D 638, ASTM D 792 y ASTM D 256, respectivamente. Los resultados que se reportaron para un refuerzo de 20 vol% fueron: resistencia y módulo a tracción de 16 y 356 MPa, respectivamente, resistencia y módulo a flexión de 36 y 789 MPa, respectivamente, y resistencia al impacto de 7.46 kJ/mm². Mientras que para un refuerzo de 50 vol% las propiedades mecánicas del material se incrementaron como se indica a continuación: resistencia y módulo a tracción de 23 y 492 MPa, respectivamente, con una resistencia a la flexión de 56 MPa, módulo de elasticidad a flexión de 1480 MPa y resistencia al impacto de 10.66 kJ/mm² [31].

El trabajo realizado por A. Athijayamani consistió en estudiar el efecto de absorción de humedad sobre las propiedades mecánicas del compuesto híbrido

de matriz poliéster y fibras de roselle y sisal orientadas en forma aleatoria. Las muestras fueron preparadas para varios porcentajes en peso (10 – 30 vol%) y para varias longitudes de fibra (50 – 150 mm). Luego de los ensayos de absorción de humedad, se midió la resistencia a la tracción de los compuestos de acuerdo al procedimiento de la ASTM D638, flexión con el arreglo de tres puntos con norma ASTM D790 y ensayo de impacto Izod bajo el procedimiento de la ISO 180. La resistencia a la tracción de los compuestos que tienen 10 vol% y 150 mm, 20 vol% y 150 mm y 30 vol% y 150 mm fueron 48 MPa, 51 MPa y 59 MPa, respectivamente, en condiciones secas. La resistencia a la flexión de los compuestos con las mismas configuraciones mencionadas anteriormente de 10 vol% y 30 vol% fueron 73 MPa y 70 MPa, respectivamente, en condiciones secas. La mejor resistencias a impacto que se registró fue con el compuesto de 20 vol% y 150 mm que en condiciones secas presentó una resistencia al impacto de 1.41 kJ/mm² [32].

1.4. JUSTIFICACIÓN

Los estudios existentes que comparan el desempeño del ciclo de vida de los compuestos con fibras naturales y los compuestos reforzados con fibras de vidrio, han encontrado que los compuestos de fibra natural son ambientalmente superiores en aplicaciones específicas por las siguientes razones: (1) la producción de fibra natural genera menor impacto en el ambiente en comparación con los procesos de producción que se llevan a cabo para la obtención de la fibra de vidrio; (2) los compuestos reforzados con fibra natural tienen mayor contenido de fibra para un desempeño equivalente, lo cual reduce la cantidad de matriz polimérica contaminante (la producción de PP requiere alrededor de 20 veces más energía que la producción de fibra natural); (3) el menor peso de los compuestos elaborados con fibras naturales mejora la eficiencia del combustible y reduce las emisiones durante su uso en componentes automotrices (en 175000 km de recorrido de un automóvil, 1 kg de reducción de peso le ahorra entre 5,95-8,4 l de gasolina y sus correspondientes reducción de emisiones de producción y quema de estos combustibles) y (4) en la incineración,

al final de la vida útil de las fibras naturales resultan en menos energía y carbón necesarios para este propósito (14 MJ/kg). [33]

Por las razones antes mencionadas, el presente estudio tiene como finalidad desarrollar un material compuesto híbrido de matriz polipropileno reforzado con fibra de abacá y fibra de vidrio que presente buenas características físicas y mecánicas y que a la vez contribuya con el cuidado del medioambiente. La combinación de las fibras natural y sintética permitirá incorporar al nuevo material la resistencia y la biodegradabilidad de las fibras de abacá y la maleabilidad, la resistencia a los químicos y la resistencia a la tracción que posee la fibra de vidrio.

Por otra parte, la consecución del presente proyecto de titulación aportaría al desarrollo económico y social de nuestro país ya que la información científico-tecnológica obtenida serviría como base para la fabricación de materiales compuestos no tradicionales, así la fibra de abacá no se exportaría únicamente como materia prima sino como parte de productos con mayor valor agregado. Finalmente, la realización del presente proyecto contribuiría con el desarrollo social de las zonas rurales ya que los agricultores encargados del cultivo del abacá como los trabajadores que se involucren con la industria de este nuevo material se verán beneficiados por esta actividad productiva.

1.5. OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto de titulación es:

Obtener, caracterizar y evaluar el comportamiento de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzada con fibras de vidrio y abacá mediante moldeo por compresión.

Los objetivos específicos del trabajo a realizar son:

- Construir moldes para la obtención de probetas de materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzados con fibras de abacá y vidrio mediante moldeo por compresión.

- Determinar la fracción volumétrica más adecuada de refuerzo para obtener probetas para ensayos mecánicos considerando la facilidad de fabricación, la uniformidad de distribución de las fibras y el comportamiento de las probetas obtenidas.
- Determinar los valores más adecuados de los parámetros del proceso de moldeo por compresión de placas de polipropileno, siendo estos: temperatura, presión y tiempo durante las fases de precalentamiento, moldeo y enfriamiento.
- Caracterizar las probetas obtenidas luego de combinar fibra corta y fibra continua de abacá y fibras de vidrio a través de ensayos de tracción, flexión e impacto.
- Evaluar el desempeño de las probetas, al variar el tamaño de las fibras naturales empleadas como refuerzo.
- Elaborar un prototipo de un producto existente en el mercado, utilizando el material compuesto que presente las mejores combinaciones de sus propiedades.
- Comparar el desempeño mecánico y funcional del prototipo obtenido, con el producto que se busca reemplazar.

1.6. ALCANCE

1. Se fabricarán moldes para obtener placas de material compuesto híbrido de matriz polimérica (polipropileno) reforzado con fibras de vidrio y abacá utilizando moldeo por compresión, las mismas que servirán para elaborar probetas para determinar sus propiedades mecánicas. Este molde permite fabricar placas de polipropileno y del material compuesto híbrido con el espesor y la longitud requeridos por las normas ASTM. Además, facilita una distribución uniforme de la fibra y del material compuesto en general.
2. El conformado del material compuesto híbrido se consigue luego de fabricar placas (preformas) de polipropileno que combinadas con fibra de abacá y fibra de vidrio permite la obtención de compuestos tipo sánduche.

3. Se determinarán los parámetros de procesamiento para la elaboración de placas que garanticen la obtención de muestras libres de defectos. Estos parámetros incluyen: temperatura de precalentamiento, temperatura de moldeo y la presión de moldeo.
4. Se emplearán refuerzos para obtener materiales híbridos con dos fracciones volumétricas cuyo contenido de fibras de abacá y fibras de vidrio se variarán relativamente entre 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0 %. La configuración del refuerzo será con fibra de vidrio en forma de mat y con fibras cortas de abacá de 10 y 20 mm distribuidas al azar y fibra unidireccional longitudinal.
5. Se obtendrán probetas del material compuesto a partir de las placas obtenidas del moldeo. Para esto se cortará con sierra de diente fino para luego ensayar las probetas a tracción, flexión e impacto de acuerdo con las normas ASTM D 3039/3039M, ASTM D 7264/D 7264M-07 y ASTM D 256-10, respectivamente con la correspondiente recopilación de datos.
6. Se analizarán los resultados y se seleccionará el material compuesto que presente las mejores propiedades mecánicas. Se construirá un prototipo de un producto comercial disponible en el mercado para comparar su desempeño funcional y mecánico con respecto al de los productos desarrollados con los compuestos obtenidos.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se detalla el método de obtención del material compuesto híbrido, así como también la maquinaria, equipos y herramientas requeridas para su procesamiento. Inicialmente, se describe los materiales empleados para la elaboración de los compuestos híbridos. Además, se definen los parámetros del proceso para la obtención de los materiales compuestos con la mínima cantidad de defectos superficiales. Finalmente, se describen los criterios de selección del prototipo así como también la metodología empleada para su elaboración, la misma que contempla la configuración que presente las mejores propiedades mecánicas.

2.1. MATERIALES, EQUIPOS Y TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO

2.1.1. MATERIALES

Este apartado incluye las definiciones y características de los materiales a partir de los cuales se obtuvieron los materiales compuestos híbridos del presente proyecto, así como también la descripción del equipo de moldeo por compresión.

2.1.1.1. Matriz polipropileno

Como matriz del material compuesto híbrido se utilizó polipropileno PH1310, proporcionado por la empresa chilena Petroquim. Este material es un homopolímero que presenta buena procesabilidad, una adecuada estabilidad durante su procesamiento, buena rigidez y balance de las propiedades mecánicas. Sus características se detallan en la Tabla 2.1 y en la hoja técnica que se encuentra en el Anexo 1. Además, este polímero cumple con las especificaciones de la FDA (Food and Drug Administration), en cuanto al requerimiento de toxicidad nula, razón por la cual puede ser utilizado en embalajes para alimentos. Se comercializa en forma de pellets, como se puede apreciar en la Figura 2.1. Este material es comúnmente empleado en para procesos de inyección debido a su alto índice de fluidez.



Figura 2.1. Polipropileno PP-PH1310 Petroquim.

Tabla 2.1. Propiedades de polipropileno.

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valor
Índice de fluidez 2,16 kg/239°C	D 1238-95	g/10 min	13
Temperatura de ablandamiento VICAT (1 kg)	D 1525-97	°C	154
Temperatura de deformación térmica – HDT (455 kPa)	D 648-97	°C	95
Resistencia al impacto IZOD a 23 °C	D 256-93	J/m	34
Resistencia a la tracción (en el punto de fluencia)	D 638-97	MPa	3
Elongación (en el punto de fluencia)	D 638-97	%	12
Módulo de elasticidad en flexión	D 790-97	MPa	1500

2.1.1.2. Fibra de vidrio

Como parte del refuerzo híbrido se utilizó mats de fibra de vidrio cuyo espesor promedio es de 0,56 mm. Este material está formado por filamentos individuales de 50 mm de largo y 0,02 mm de diámetro promedio distribuidos al azar, como se presenta en la Figura 2.2. Al mismo tiempo, la orientación de estos filamentos permite asegurar una resistencia consistente, muy independiente de la dirección que esta tenga. Cabe señalar que la relación peso/área de la fibra de vidrio en forma de mat es de 0,338 g/cm² y se utiliza principalmente en estratificación manual, laminados continuos y en aplicaciones en moldes cerrados. En consecuencia, la utilización de fibras de vidrio en forma de mats como refuerzo

permite fabricar productos muy resistentes, ligeros y con facilidad de manejo en el corte.

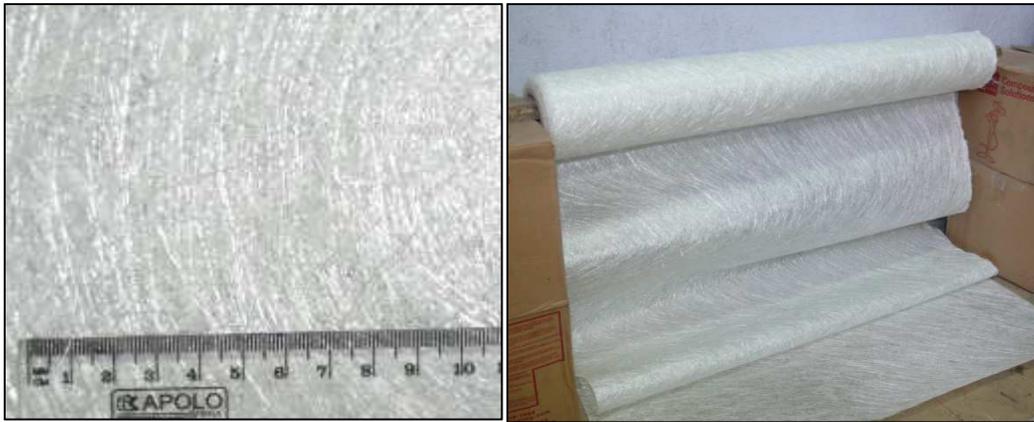


Figura 2.2. Fibra de vidrio en forma de mat.

2.1.1.3. Fibra de abacá

La fibra de abacá es una fibra natural con elevada resistencia a la tracción de $111,28 \pm 30,17 \text{ kg/mm}^2$ (Morejón y Narváez, 2004). Para este proyecto se utilizó la fibra del tipo Tangongón Rojo de calidad 3 adquirido a productores locales de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. En la Figura 2.3 se muestra la fibra cortada a 10 mm para la preparación de materiales compuestos.



Figura 2.3. Fibra de abacá cortada a 10 mm.

2.1.2. EQUIPOS

Los equipos que se emplearon para analizar la materia prima, obtener y caracterizar los materiales compuestos híbridos se detallan en la Tabla 2.2. En esta tabla primero se describen los equipos utilizados en el análisis de las fibras de abacá y en segundo lugar, se detallan los equipos utilizados para obtener las láminas de materiales compuestos híbridos. Finalmente, se enuncian los equipos utilizados para los ensayos de tracción, flexión e impacto, así como la máquina para la evaluación del prototipo.

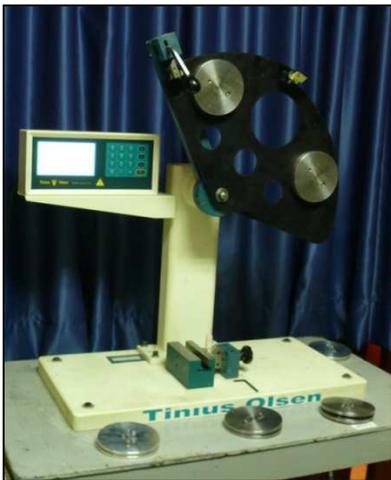
Tabla 2.2. Características del equipo utilizado.

Equipo	Descripción	Fotografía
Balanza analítica marca AE ADAM, modelo PGL 6001	Balanza digital con capacidad máxima de 6000 g, d = 0,1 g	
Balanza analítica de precisión Shimadzu modelo AUX220	Capacidad máxima de 220 g y una apreciación de 0,1 mg.	
Analizador de humedad Ohaus, modelo MB45	Capacidad: 45 g Sensibilidad: 0,001g Rango de humedad: 0,01% a 100%	

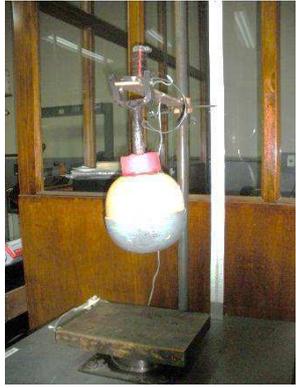
Continuación de Tabla 2.2

Equipo	Descripción	Fotografía
<p>Molde cerrado tipo macho-hembra</p>	<p>Construido en acero A-36, cuyas dimensiones internas son 252 mm x 252 mm. Los planos se presentan en el Anexo 2. El espesor de las probetas fue definido de acuerdo a las normas ASTM para ensayos de tracción, flexión e impacto.</p>	 <p>1. Macho 2. Base 3. Marco</p>
<p>Prensa calefactora marca CARVER modelo 4128 S/N 4128-251</p>	<p>Prensa calefactora manual que presenta un sistema de control de temperatura digital y un sistema de presión hidráulica con manómetros. Además, consta de dos planchas calefactoras superior e inferior. Esta prensa tiene un rango de trabajo de 0 – 60000 lb, área de trabajo de 12” x 12” y alcanza temperaturas de hasta 343°C.</p>	
<p>Prensa hidráulica marca Hydraulic Jack</p>	<p>Prensa hidráulica con capacidad de 12 toneladas y una separación de 660 mm entre columnas.</p>	
<p>Medidor de temperatura marca Fluke</p>	<p>Medidor de temperatura con termocupla tipo J: -210°C a 1200°C Precisión: Sobre -100°C: tipo J ± [0,05% + 0,3°C]</p>	

Continuación de Tabla 2.2

Equipo	Descripción	Fotografía
<p>Estufa marca MMM, modelo Venticell 404 - Standard</p>	<p>Volumen de la cámara: 404 L. Temperatura de trabajo desde + 10°C sobre la temperatura ambiente hasta 300°C</p>	
<p>Máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen modelo H25KS</p>	<p>Capacidad de 25000 N</p>	
<p>Máquina de ensayo de impacto marca Tinius Olsen modelo IT 504</p>	<p>Capacidad básica del péndulo: 2,82 J. Capacidad del péndulo incrementada en pesos que se añaden: disponibles hasta 25 J. Altura de lanzamiento: 0,61 m. Velocidad de impacto: 3,46 m/s.</p>	

Continuación de Tabla 2.2.

Equipo	Descripción	Fotografía
Plancha calefactora de láminas Thermo Scientific modelo Cimarec	Rango de temperatura de 5 a 540°C.	
Molde de acero para termoformado	Dimensiones: 220 x 195 mm Planos y fotografías en el Anexo 3	
Máquina de impacto con accesorios para ensayos en canilleras	Altura máxima: 1000 mm Peso del impactador: 5 kg	

Equipos y otros instrumentos empleados

La preparación de láminas y probetas de material compuesto híbrido requirió de herramientas y consumibles adicionales a los mencionados en el apartado anterior y algunos de ellos se muestran en la Figura 2.4. Por ejemplo, el molde recibió una capa de agente desmoldante, marca Simoniz hecha a base de cera de carnauba, lo que facilitó la extracción del material. Las fibras cortas de abacá de 10 y 20 mm fueron tamizadas con un tamiz ASTM E-11 para facilitar la dispersión de las mismas en el molde. Además, la herramienta de corte empleada para cortar las probetas de polipropileno y de los materiales compuestos híbridos fue una sierra de diente fino marca Starrett, tipo HSS, modelo BS1218 (300 mm 18T). Finalmente, se determinaron las dimensiones de las probetas con un calibrador

marca Mitutoyo, modelo Absolute Digimatic ($12''/300$ mm), un micrómetro marca Mitutoyo y un medidor de espesores marca Pantec. Se pulieron las superficies de corte de las probetas con lijas de 180 y 240 de tamaño de grano y se utilizó una plantilla metálica con las dimensiones de la canillera.



Figura 2.4. Instrumentos de medición: (a) micrómetro, (b) medidor de espesores, (c) calibrador pie de rey.

2.1.3. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

En la **Figura 2.5** se detalla la estrategia metodológica seguida durante el presente proyecto de titulación. Primero, se fabricó un molde y se realizaron pruebas preliminares para definir los parámetros de temperatura, presión y tiempo en las distintas fases de moldeo. Luego se elaboraron láminas de material compuesto híbrido y se obtuvieron probetas para ensayos de tracción, flexión e impacto. Finalmente, se analizaron los resultados de los ensayos y se determinó la mejor fracción volumétrica con la que se elaboró el prototipo.

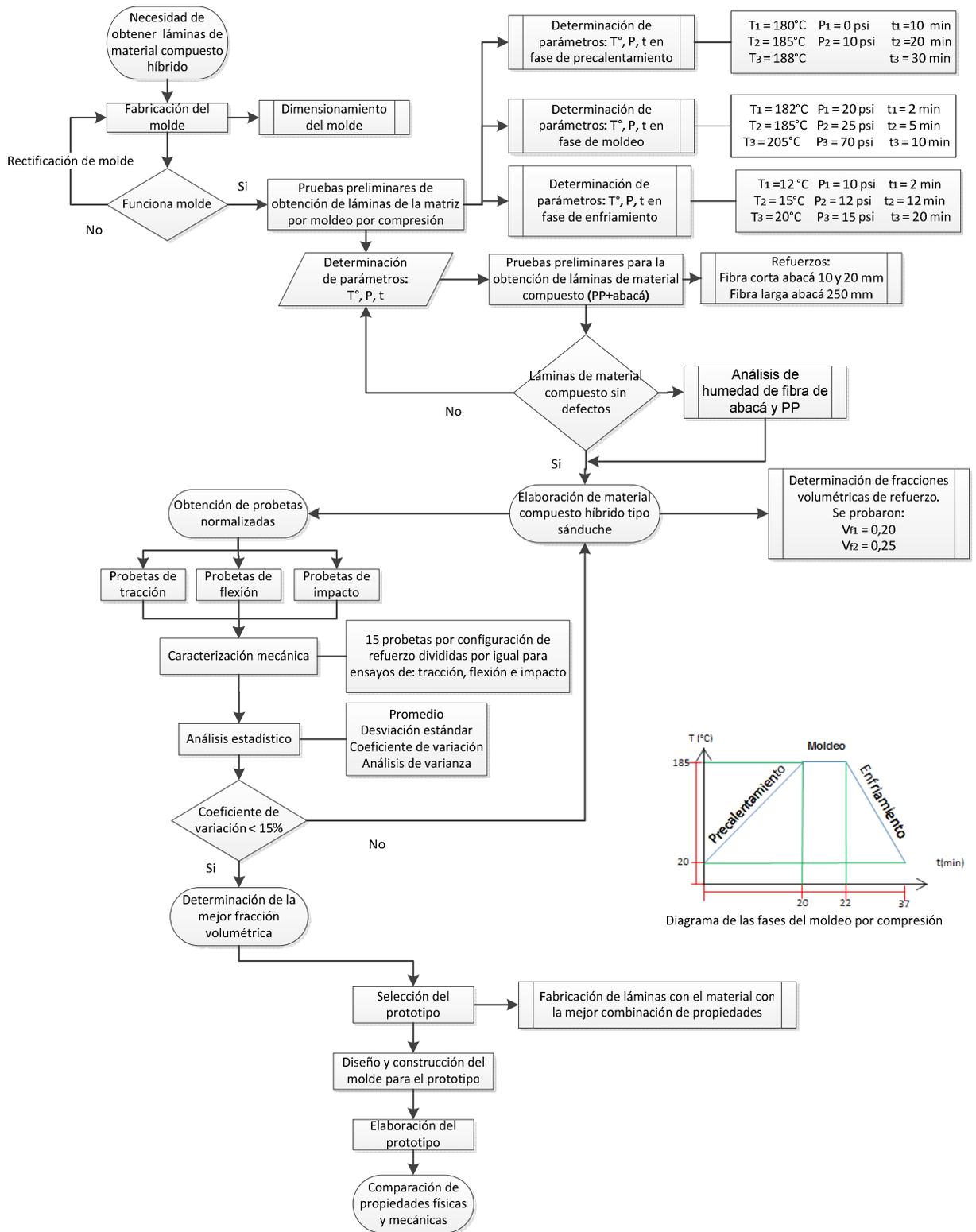


Figura 2.5. Diagrama de flujo de la estrategia metodológica seguida en el proyecto de titulación.

2.2. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ

Este apartado detalla los estudios preliminares, tratamientos y técnicas empleadas para la elaboración de láminas de material compuesto híbrido, a partir de las cuales se obtuvieron probetas para la realización de los respectivos ensayos previstos en el presente estudio. Además, se detallan las técnicas utilizadas para la obtención del nuevo material en el siguiente orden: (i) preparación y tratamientos de las fibras de abacá, fibra de vidrio y polipropileno, (ii) fabricación del material compuesto híbrido, (iii) caracterización de los materiales y (iv) selección del prototipo.

2.2.1. PRUEBAS PRELIMINARES PARA ESTABLECER EL DESEMPEÑO DEL MOLDE

Mediante la elaboración de láminas de matriz de polipropileno se estableció el desempeño del molde. La evaluación se la realizó mediante la observación de fugas del material en los puntos de unión de las piezas del molde al aplicar presión y temperatura. Además se elaboraron materiales compuestos reforzados con 5% de fibra de abacá. En estas pruebas se determinó la presión de moldeo y las pérdidas de material. Se realizaron pruebas con tres diferentes presiones, las mismas que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Pruebas preliminares de presión de moldeo del PP.

Prueba	Presión [psi]
A	156
B	104
C	91

2.2.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El material compuesto reforzado con fibras de abacá al 5%, presentó burbujas internas alrededor de las fibras, defecto que pudo ser producido debido a la humedad en las mismas y/o en los pellets de PP, también una causa pudo ser el

método de aplicación abrupta de la presión. Con el objeto de eliminar la presencia de burbujas de aire en el material se sometieron a las fibras y a los pellets plásticos a los procesos que se describen a continuación.

2.2.2.1. Preparación de fibras de abacá

La fibra de abacá está disponible en forma de atados de longitudes entre 4 m y 6 m, por tanto, luego de seleccionarla y con la ayuda de unas tijeras se cortaron las fibras de acuerdo a las dimensiones planteadas para este estudio.

Preparación de fibra corta de abacá de 10 y 20 mm

Para este proceso se partió de fibra de aproximadamente 500 mm de longitud, de la cual se removieron las secciones pilosas y fibras con diámetros fuera del rango establecido para la calidad 3 de fibra de abacá ($151,4 - 284 \mu\text{m}$)⁷. Luego, se cortaron fibras de 10 y 20 mm de longitud, las cuales fueron tamizadas para eliminar formaciones grumosas, como se indica en la Figura 2.6.

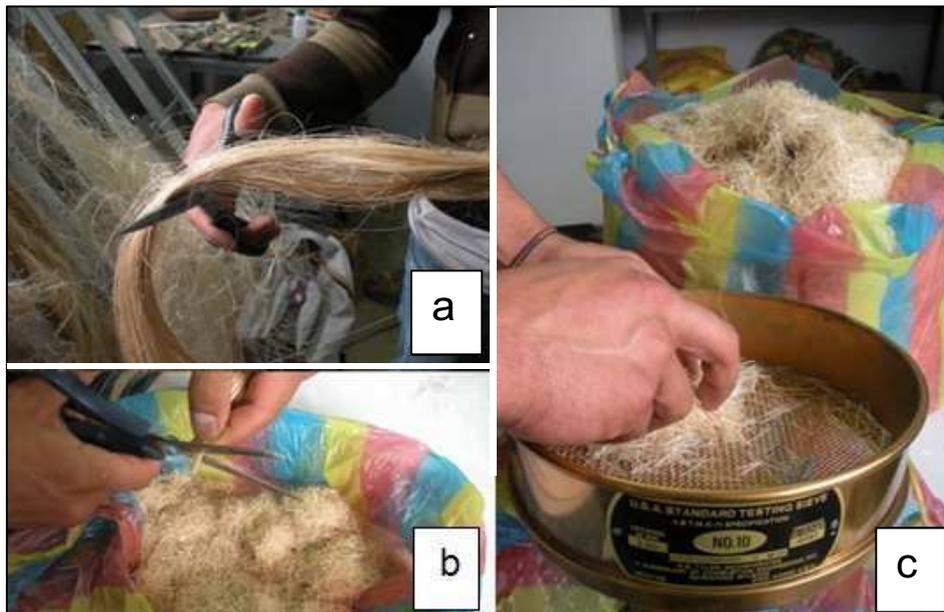


Figura 2.6.Preparación de la fibra corta de abacá de 10 mm. a) Corte de la fibra a 500 mm, b) Selección y corte de fibra a 10 mm y c) Tamizado de la fibra.

⁷ Páez, J.; Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeado por compresión; EPN; Quito; 2007.

Análisis de humedad y secado de fibras de abacá

Se realizaron pruebas preliminares con fibras secas y sin secar, con el propósito de determinar el efecto del contenido de humedad en la fibra de abacá en la obtención de láminas de material compuesto híbrido. Los valores de temperatura y tiempo considerados para el proceso de secado de la fibra de abacá se indican en la Tabla 2.4. Además, cabe mencionar que no se humedecieron las fibras de abacá en un proceso previo.

Tabla 2.4. Valores de temperatura y tiempo de secado para la fibra corta de abacá de 10 y 20 mm.⁸

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
A	90	12
B	80	6
C	70	2
D	Fibra sin secar	

Preparación de fibra continua de abacá de 250 mm

Se cortaron grupos de fibras de 300 mm y se ató uno de los extremos de cada uno de los grupos. Se retiraron las pilosidades y restos de fibras de diámetros menores a la utilizada, posteriormente se humedecieron y se alisaron manualmente, mientras se estiraba desde el primer atado hacia abajo se iba desenredando fibras entrelazadas y retiraba algunas pilosidades, a continuación se ató el otro extremo y se trasladaron los atados a la estufa para el secado. En la Figura 2.7 se pueden apreciar los pasos de la preparación de la fibra continua.

⁸ PONTÓN, P; Estudio del efecto de encolado de fibra de abacá en el mejoramiento de su capacidad de tisaje; Escuela Politécnica Nacional; 2009.

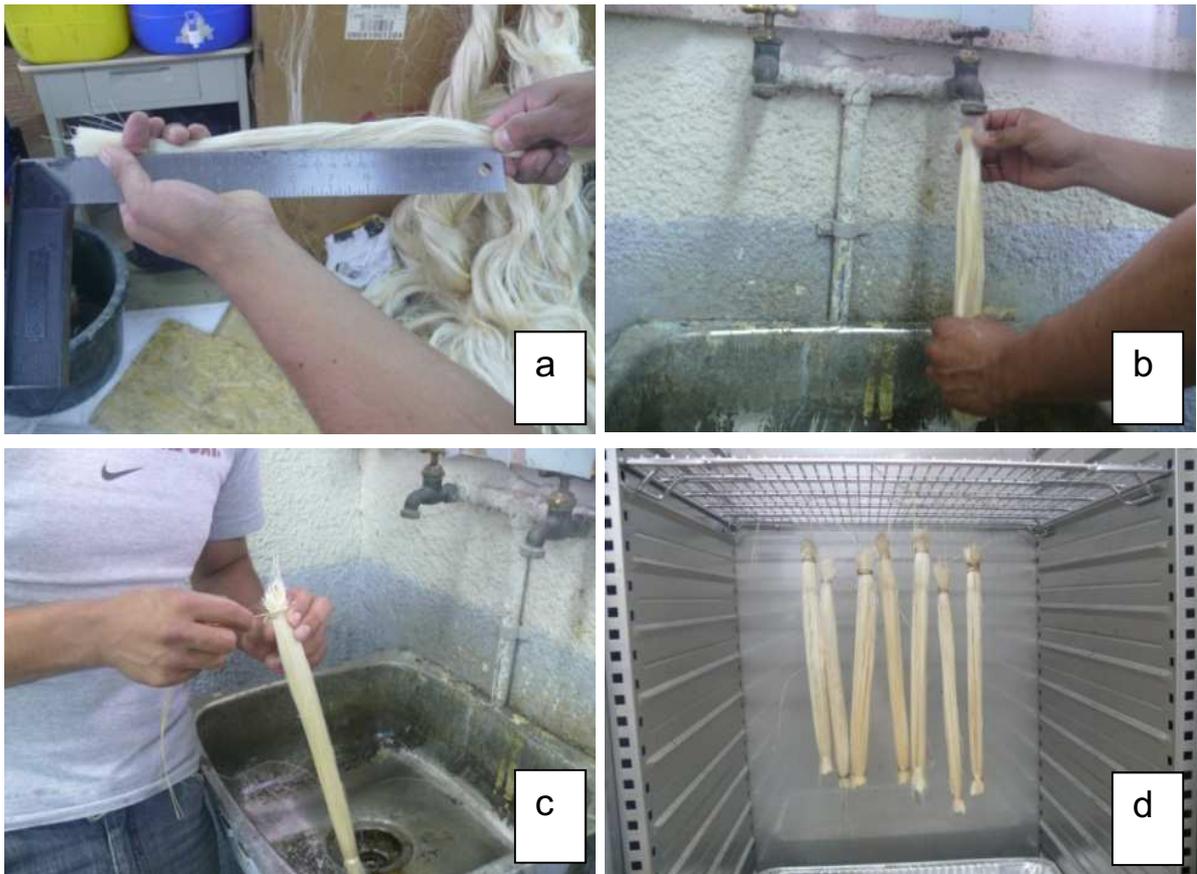


Figura 2.7. Preparación de la fibra continua de abacá de 250 mm: (a) corte de un mechón de la fibra de 300 mm, (b) lavado y remoción de pilosidades, (c) ajuste de los extremos del mechón luego del lavado, (d) mechones de abacá en el interior de la estufa para su posterior secado.

Las fibras continuas se sometieron a un proceso de secado similar al de las fibras cortas con la diferencia de que en este caso los parámetros de temperatura y tiempo fueron mayores debido a su mayor contenido de humedad. Este proceso se realizó a 70°C⁹ durante 12 h. Este humedecimiento y secado permitió obtener fibras lisas que facilitaron la fabricación de los compuestos.

2.2.2.2. Preparación de fibras de vidrio

Se cortaron láminas de mat de fibra de vidrio de las dimensiones requeridas para la fabricación de láminas del material compuesto, para lo cual se trazó en el rollo de mat la forma de las láminas tomando como referencia la tapa del molde (macho del molde), como se muestra en la Figura 2.8.

⁹ PONTÓN, P; Estudio del efecto de encolado de fibra de abacá en el mejoramiento de su capacidad de tisaje; Escuela Politécnica Nacional; 2009.

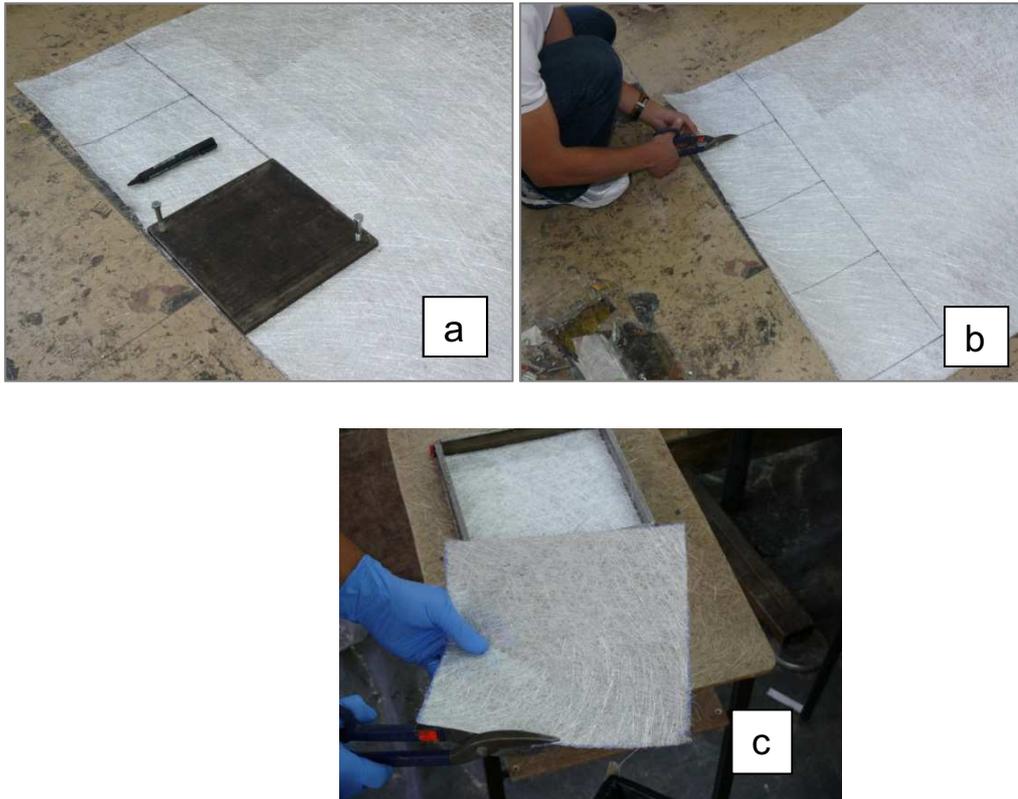


Figura 2.8. Cortes en la fibra de vidrio: (a) trazado en la fibra de vidrio de acuerdo a las dimensiones del molde, (b) corte de láminas de fibra de vidrio, (c) extracción del exceso.

2.2.2.3. Determinación de las características de los pellets de polipropileno

La evaluación de las láminas de matriz polipropileno obtenidas en las pruebas preliminares fue examinada a través de una inspección visual que consistió en observar la cantidad de burbujas y los diferentes defectos existentes en las láminas elaboradas. Al inspeccionar los defectos se planteó una hipótesis, la misma que consistió en que las burbujas se producen por la humedad acumulada en los pellets a nivel superficial por la humedad absorbida del ambiente. Se realizó un análisis de humedad igual al realizado a las fibras de abacá, como se ilustra en la Figura 2.9.

Se realizaron tres análisis, para los cuales se pesaron 15 g de PP. Las temperaturas de secado de los pellets de polipropileno se eligieron tomando como referencia la temperatura de deformación térmica dada en la ficha técnica del

material (95°C^{10}), la misma que se presenta en el Anexo 1. Los datos de temperatura se pueden apreciar en la Tabla 2.5.



Figura 2.9. Pellets de polipropileno en el analizador de humedad.

Tabla 2.5. Valores de temperatura y tiempo de secado para el polipropileno

Ensayo	Parámetros de secado del polipropileno	
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (h)
A	70	2
B	90	12
C	PP sin secar	

2.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

En este apartado se describen los procesos y técnicas realizadas para la obtención de un material compuesto híbrido con buenas características. En primer lugar se definen las fases que intervienen en el moldeo por compresión junto con sus respectivos parámetros. Luego se explica la técnica empleada para conformar el material compuesto reforzado únicamente con fibra de abacá y la distribución de las fibras en el molde para formar el compuesto tipo sánduche. Finalmente, se detallan las configuraciones de refuerzo híbrido que se utilizaron en este proyecto y las técnicas empleadas.

¹⁰ Temperatura de deformación térmica – HDT (455 kPa)

2.3.1. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

El proceso de moldeo por compresión empleado en este proyecto constó de tres fases: (i) fase de precalentamiento, (ii) fase de moldeo y (iii) fase de enfriamiento. Los parámetros de presión, temperatura y tiempo para las distintas etapas del moldeo por compresión fueron definidas mediante la elaboración de láminas de matriz polipropileno. La cantidad de polipropileno empleada se calculó en función de las dimensiones deseadas de la lámina y se añadió un 5% por pérdidas debido a fugas de material.

En la *fase de precalentamiento* los pellets de polipropileno fueron colocados en el centro del molde, el cual fue posicionado dentro de la prensa calefactora. Luego, se fijó la temperatura de las placas de la prensa para alcanzar la fusión de los pellets sin la aplicación de presión. En la Figura 2.10 se puede apreciar el procedimiento seguido en la fase de precalentamiento.

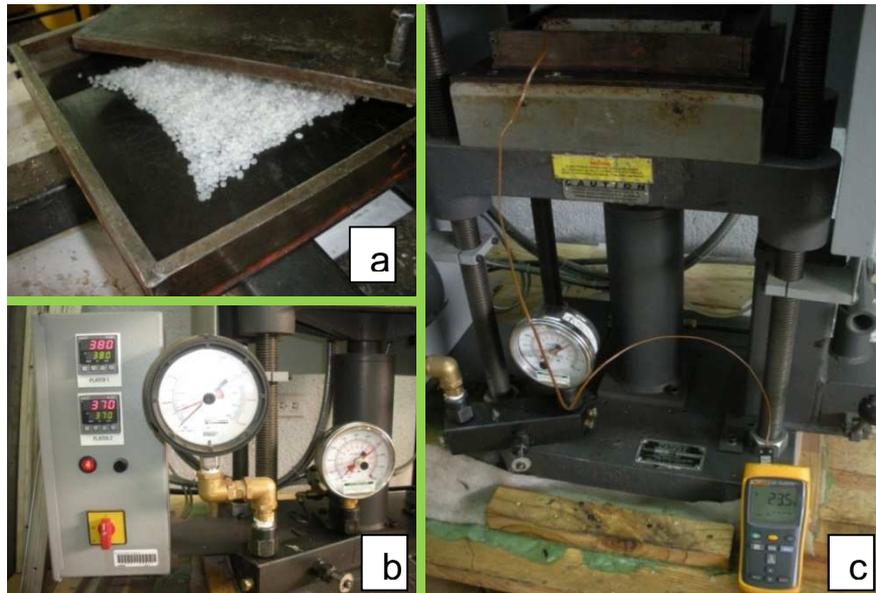


Figura 2.10. Método de procesamiento del material para la obtención de láminas de polipropileno: (a) distribución de los pellets en el molde; (b) temperatura de la prensa; (c) control de la temperatura en el macho del molde.

En la *fase de moldeo* se mantuvo la temperatura seleccionada en la fase de precalentamiento. Con el fin de distribuir el material en toda la superficie del molde y evitar la formación interna de burbujas de aire, se probaron diferentes

valores de presión durante un período de 2 minutos. Los valores de presión aplicada sobre el molde fueron de 90, 70, 35 y 25 psi¹¹. Las láminas obtenidas de este proceso fueron enfriadas con agua a una temperatura media de 18°C.

La selección de la presión de moldeo se realizó a partir de una inspección visual de las láminas obtenidas, en la cual se consideró la mínima cantidad de pérdidas de material entre el marco del molde y el macho, así como también, la cantidad de burbujas internas de aire que se produjeron durante este proceso.

En la *fase de enfriamiento* se experimentaron tres formas diferentes de enfriamiento:

- a) Enfriamiento al ambiente, que consistió en dejar al molde a temperatura ambiente de aproximadamente 20°C sin la aplicación de presión durante 15 minutos. Previo a este enfriamiento, en la mesa de trabajo se retiraron las pérdidas de matriz.
- b) Enfriamiento con agua a temperatura media, que consistió en sumergir al molde en agua a 18°C, durante 5 minutos, inmediatamente después de sacarlo de la prensa calefactora.
- c) Enfriamiento con presión, que consistió en enfriar el molde en una prensa hidráulica a temperatura ambiente durante 15 minutos. Las presiones probadas fueron: 26, 19, 6 y 13 psi.

2.3.2. CONFORMACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ

Para la obtención del material compuesto se emplearon dos porcentajes volumétricos de refuerzo 20 y 25%. Asimismo, se probaron fibras de 10 y 20 mm de longitud distribuidas al azar, y fibra continua orientada longitudinalmente. El material compuesto tuvo una configuración tipo sánduche y estuvo constituido por dos láminas de polipropileno, entre las cuales se ubicaron las fibras de abacá tratadas según se explicó en el acápite 2.2.2.1 como se aprecia en la Figura 2.11.

¹¹ PAEZ, J; Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Escuela Politécnica Nacional; 2007.



Figura 2.11. Elaboración de material compuesto conformación tipo sánduche utilizando fibra de abacá de 20 mm.

Las láminas de material compuesto fueron fabricadas mediante moldeo por compresión de acuerdo con los parámetros de procesamiento definidos en la obtención de láminas de matriz polipropileno.

La distribución homogénea de la fibra de abacá en el molde se hizo manualmente como se aprecia en la Figura 2.12. Para el caso de la fibra continua, su distribución fue un poco más compleja, debido a que después de su tratamiento, antes de ser colocada en el molde se retiraron sus pilosidades.



Figura 2.12. Colocación de fibra de abacá en el molde: (a) Distribución de fibra corta; (b) Distribución de fibra continua.

Para la elaboración del compuesto reforzado con fibras unidireccionales, se fabricaron tres láminas de matriz, la misma que se intercaló con dos capas de fibras de abacá, donde la tercera placa se colocó en la mitad de la fibra de abacá,

para lo cual se dividió y se pesó la fibra en dos partes iguales. Esto permitió que la matriz protegiera completamente a la fibra de abacá y se lograra un buen grado de mojado entre la matriz y el refuerzo. Lo expuesto se observa en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Configuración en capas de matriz y refuerzo dentro del molde.

2.3.3. CONFORMACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO

La elaboración del material compuesto reforzado con mat de fibra de vidrio se realizó con los mismos parámetros empleados para la obtención del compuesto reforzado con fibras de abacá. También se utilizaron tres láminas de matriz para conseguir materiales compuestos con una correcta interfaz matriz-refuerzo.

2.3.4. ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

Se elaboraron materiales compuestos con refuerzo híbrido constituido por fibra de abacá y fibra de vidrio, cuyos porcentajes volumétricos fueron 20 y 25%. Además, se variaron las proporciones relativas de las fibras de abacá / vidrio dentro del refuerzo híbrido. Estas proporciones fueron: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25. En la configuración del refuerzo se utilizó fibra de vidrio en forma de mat, fibra corta de abacá de 10 y 20 mm, distribuida al azar, y fibra continua de abacá orientada longitudinalmente.

Las láminas de compuesto híbrido fueron elaboradas de acuerdo con el procedimiento descrito para los materiales reforzados con fibra de abacá,

manteniendo los mismos parámetros de presión y temperatura. El orden de la colocación de las láminas se indica en la Figura 2.14 donde se aprecia la disposición tipo sánduche con mayor claridad.



Figura 2.14. Preparación del material compuesto híbrido tipo sánduche.

Para la fabricación de probetas de material compuesto híbrido para ensayos de flexión e impacto, se elaboraron tres láminas de matriz y esta tercera lámina fue colocada después de la fibra de abacá, con el objetivo de que la fibra natural esté completamente protegida por la matriz. Esto se realizó al elaborar láminas con mayor porcentaje de refuerzo de fibra natural como se aprecia en la Figura 2.15.



Figura 2.15. Colocación de capas de matriz y refuerzo híbrido para probetas de flexión e impacto.

Las cantidades de matriz y de refuerzo utilizadas en cada formulación de material compuesto híbrido fueron calculadas en función de las dimensiones del molde, del espesor de las láminas de material compuesto y de las densidades del polipropileno, fibras de abacá y vidrio. Dichos cálculos se presentan en el Anexo 4. Las diferentes configuraciones de refuerzos híbridos se presentan en la Figura 2.17.

Al elaborar el material compuesto híbrido reforzado con fibras de abacá de 10 y 20 mm, con porcentaje de refuerzos elevados, fue necesaria la compactación de la fibra. En el momento de distribuir las fibras en el molde, éste se saturaba debido a que la fibra natural es bastante voluminosa, por esta razón se llenó el molde con la máxima cantidad de fibra, se introdujo en una prensa hidráulica y se aplicó una presión de 200 psi. En la Figura 2.16 se puede apreciar fibra luego de la compactación.



Figura 2.16. Fibra corta de abacá compactada en el molde.

Luego de la compactación y distribución de las fibras de abacá, se colocó una lámina de matriz y otra de mat de fibra de vidrio. Finalmente, se ubicó la última lámina de matriz, para posteriormente introducir el molde en la prensa calefactora y obtener la lámina del compuesto híbrido. Los parámetros utilizados para el material compuesto híbrido son los mismos utilizados para la fabricación de las láminas de matriz.

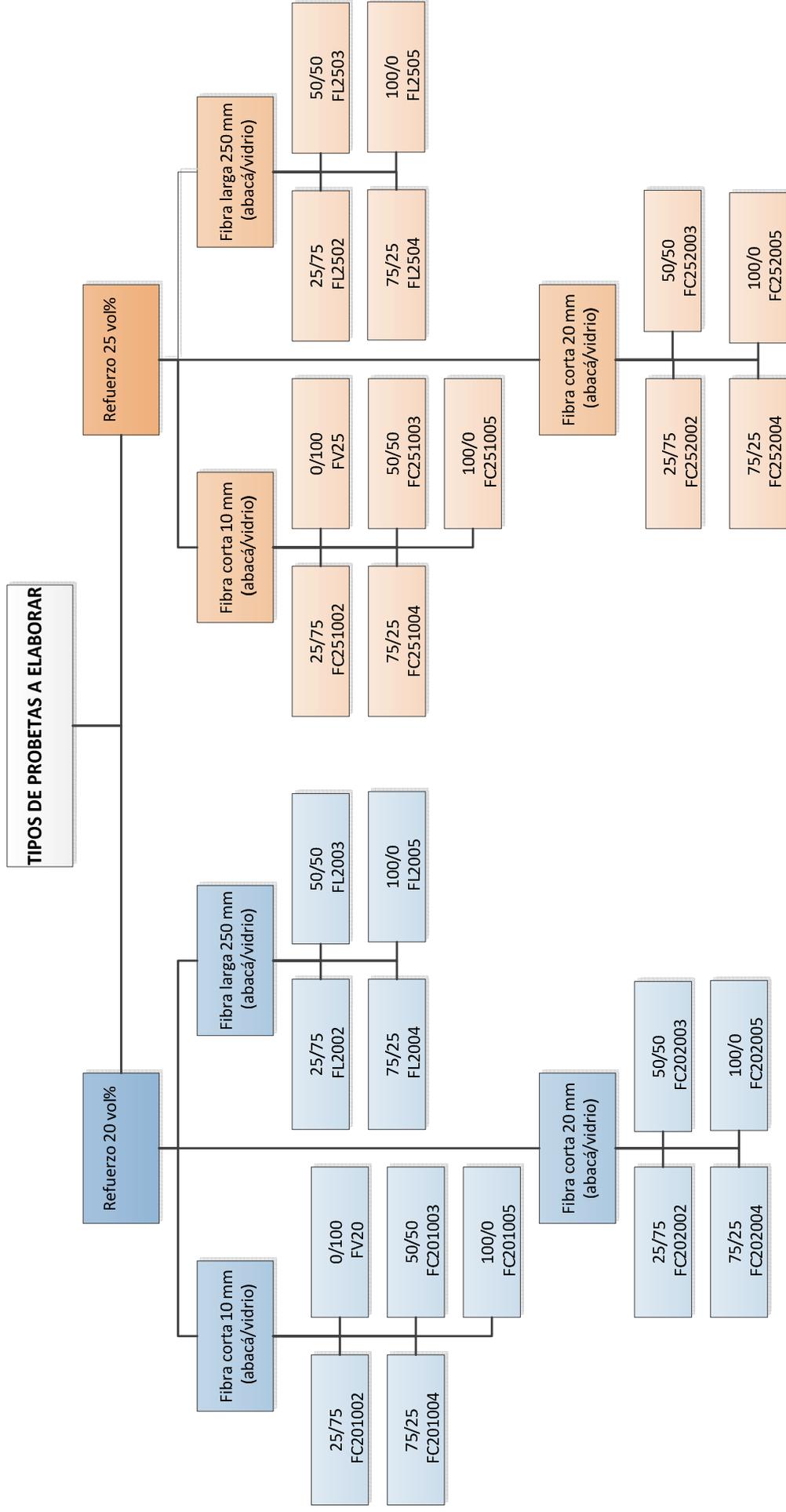


Figura 2.17. Configuraciones de refuerzos empleados para elaborar probetas de material compuesto híbrido.

2.4. OBTENCIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE LAS LÁMINAS MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

Para la caracterización de las diferentes configuraciones elaboradas del material compuesto híbrido, se obtuvieron probetas a partir de las láminas de materiales compuestos para caracterizarlos mediante ensayos de tracción, flexión e impacto.

2.4.1. PROBETAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

Para la caracterización mecánica mediante ensayos de tracción, a partir de las láminas de material compuesto híbrido de dimensiones: 250 x 250 x 2,5 mm se extrajeron probetas con las dimensiones que se aprecian en la Tabla 2.6, las cuales se obtuvieron de acuerdo con lo descrito en la norma ASTM D 3039/3039M-08. El número de probetas a extraer de la lámina fue siete. Cabe señalar que el espesor de las láminas fue de 2,5 mm, dado que este es el espesor requerido para las probetas.

Tabla 2.6. Dimensiones y tolerancias de las probetas de tracción.

Dimensión	Magnitud (mm)
Espesor	2,5 ± 0,10
Ancho	25 ± 0,25
Largo	250 ± 0,25

Las probetas extraídas de las láminas deben ser trazadas con 1,5 mm más anchas que la medida nominal debido al posterior maquinado, que consistió en un corte de las probetas con una sierra de diente fino, la cual permitió un corte limpio y libre de hendiduras. Posteriormente, las probetas fueron lijadas para retirar algunas rebabas producidas por el corte y para alcanzar las dimensiones establecidas en la norma ASTM. El maquinado de las probetas para ensayos de tracción se presenta en la Figura 2.18.

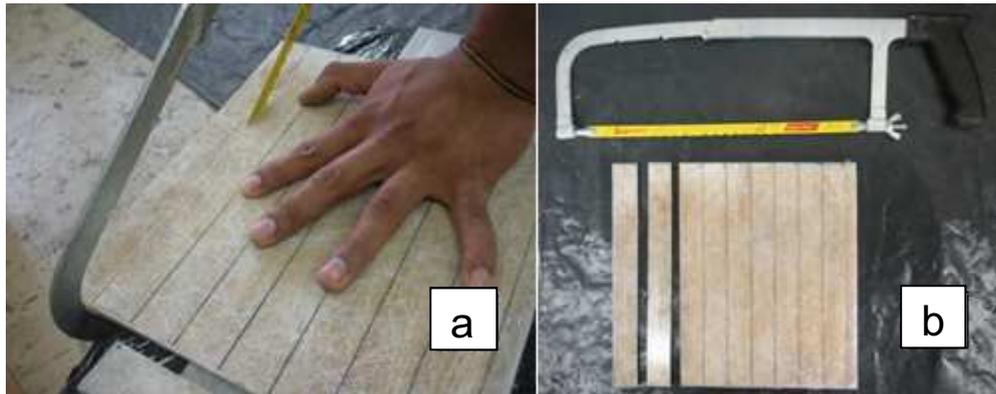


Figura 2.18. Corte de probetas: (a) sierra de diente fino; (b) probetas cortadas.

Para el lijado se recomienda pasar primero por la lija número 180, para luego dar un pulido al área de corte con la lija número 240 como se indica en la Figura 2.19.



Figura 2.19. Lijado de probetas de tracción con lija # 240.

2.4.2. PROBETAS PARA ENSAYOS EN FLEXIÓN

Al igual que en el ítem anterior, la obtención de probetas para la caracterización mediante ensayos de flexión se realizó a partir de láminas de material compuesto híbrido. La diferencia fue que las dimensiones de las probetas fueron las descritas en la norma ASTM D 7264/D 7264M-07 como se indica en la Tabla 2.7. El número de probetas extraídas de la lámina fue de siete.

Tabla 2.7. Dimensiones y tolerancias de las probetas de flexión.

Dimensión	Magnitud (mm)
Espesor	$4 \pm 0,16$
Ancho	$13 \pm 0,13$
Largo	$160 \pm 1,60$

Para empezar se tomaron medidas de la lámina para corroborar que zona tenía el espesor recomendado por la norma. Una vez determinada el área de extracción, se trazaron en la lámina las dimensiones del ancho y largo de la probeta, tomando en cuenta que el trazo tuviera 1,5 mm más de la dimensión nominal. Posteriormente se cortaron las probetas con sierra y se retiraron las rebabas con lijas. La preparación de las probetas de flexión se aprecia en la Figura 2.20.

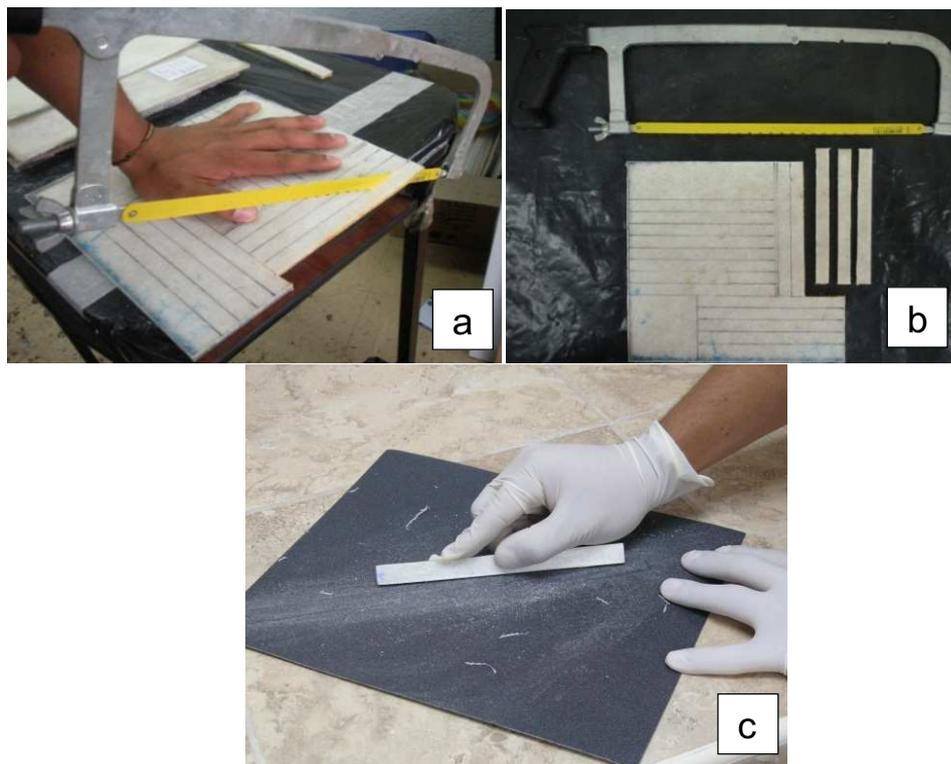


Figura 2.20. Preparación de probetas para ensayo de flexión: (a) corte; (b) probetas cortadas; (c) lijado de probetas.

2.4.3. PROBETAS PARA ENSAYOS EN IMPACTO

Del mismo modo que para los ensayos de tracción y de flexión, la obtención de las probetas para los ensayos de impacto se hizo a partir de las láminas de material compuesto híbrido. Las dimensiones de las probetas se obtuvieron de acuerdo a la norma ASTM D 256-10 como se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Dimensiones y tolerancias de las probetas de impacto.

Dimensión	Magnitud (mm)
Espesor	$6,35 \pm 0,16$
Ancho	$12,7 \pm 0,20$
Largo	$63,5 \pm 2,00$

Al igual que en el ítem anterior, se tomaron medidas del espesor de la lámina para corroborar la zona en que se tenía el espesor recomendado. Luego de la determinación del área adecuada, se trazó a lo largo de toda la lámina las dimensiones de las probetas, de manera muy similar a lo realizado para los ensayos de tracción. Las probetas fueron cortadas y lijadas, como se aprecia en la Figura 2.21.

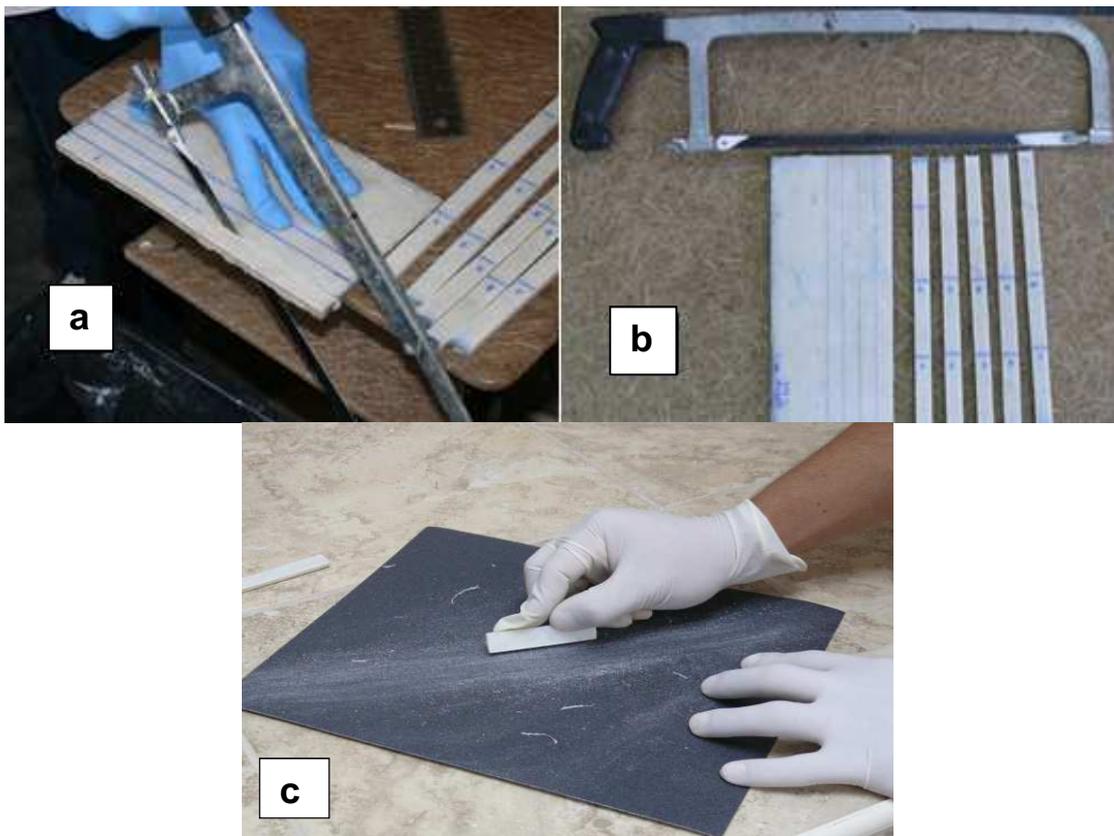


Figura 2.21. Preparación de probetas de impacto: (a) corte con sierra de diente fino; (b) probetas cortadas; (c) lijado de probetas

2.5. CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

En este apartado se explica el método de los ensayos de tracción, flexión e impacto para las probetas obtenidas de las láminas de material compuesto híbrido.

2.5.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN

Para el ensayo de tracción se utilizó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS con mordazas acopladas para sujetar las probetas de los materiales obtenidos. Antes de montar la probeta se trazó una línea en la mitad, luego, tomando esta línea como referencia se trazó una línea media pulgada arriba y abajo como establece la norma. Una vez sujeta la probeta se colocó el extensómetro en las líneas trazadas anteriormente, como se observa en la Figura 2.22.

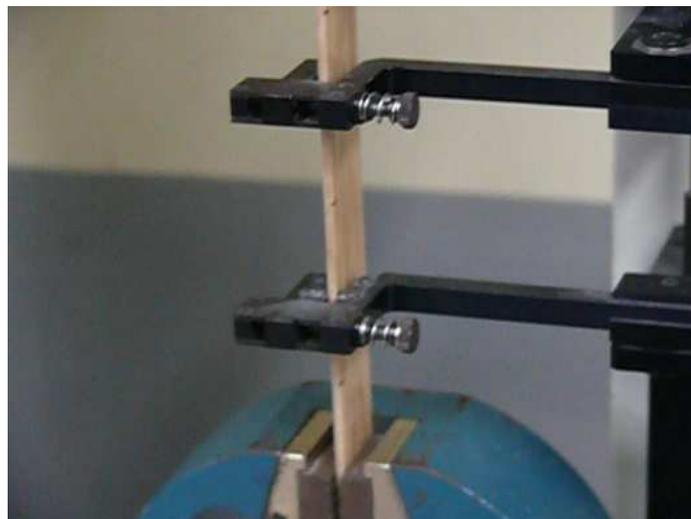


Figura 2.22. Montaje del extensómetro.

Una vez colocado el extensómetro, se fijó la velocidad del ensayo en 2 milímetros por minuto, que es la velocidad recomendada por la norma ASTM D 3039/3039M-08. Los datos generados por el extensómetro se tomaron cada 100 N. Con estas medidas se trazaron los diagramas esfuerzo vs. deformación. Para estas curvas se determinó el módulo de elasticidad, módulo de trabajo, esfuerzo máximo y deformación máxima. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de estas

propiedades mecánicas se presentan en el Anexo 5. Las condiciones del ensayo se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Condiciones de ensayo de tracción para la máquina universal de ensayos. (Ponce, 2011)

Parámetro	Cantidad (unidades)
Velocidad de desplazamiento del cabezal móvil	2 (mm/min)
Activación del extensómetro	Carrera máx. 50 (mm)
Ajuste de registro de fuerza máxima	(N)
Ajuste de registro de cuatro puntos de fuerza y desplazamiento	(N), (mm)

2.5.2. ENSAYOS DE FLEXIÓN

Para el ensayo de flexión se utilizó la máquina universal Tinius Olsen modelo H25KS. Se instaló un sistema de puntos de apoyo y un dado punzón para aplicar la carga, como se aprecia en la Figura 2.23a. Una vez colocada la probeta encima de los puntos de apoyo, el punzón se colocó en el centro de la misma. Se fijó en el equipo que su cabezal móvil se desplace en dirección vertical hacia abajo y el dado punzón ejerza una fuerza en dicha dirección como se indica en la Figura 2.23c. En la Tabla 2.10 se describen las condiciones en las cuales se configuró la máquina universal para los ensayos de flexión.

Tabla 2.10. Condiciones de ensayo de flexión para la máquina universal de ensayos. (Ponce, 2011)

Parámetro	Cantidad (unidades)
Velocidad de desplazamiento del cabezal móvil	1(mm/min)
Activación del extensómetro	no
Ajuste de registro de fuerza máxima	(N)
Ajuste de registro de cuatro puntos de fuerza y desplazamiento	(N), (mm)

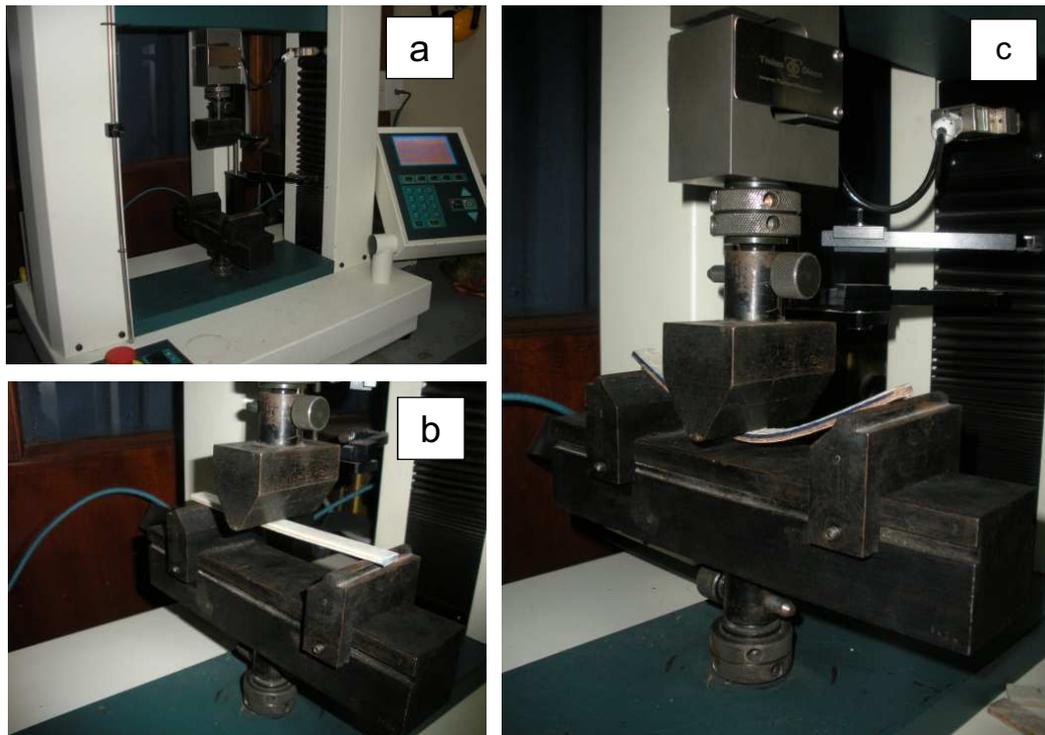


Figura 2.23. Montaje del ensayo de flexión: (a) montaje de dado para flexión a tres puntos; (b) probeta ubicada para empezar el ensayo de flexión; (c) desplazamiento del punzón al finalizar el ensayo.

Para este ensayo, la velocidad del cabezal móvil fue de 1 milímetro por minuto según lo indicado en la norma ASTM D 7264/D 7264M-07. En este ensayo la probeta se flexionó hasta llegar a su ruptura, se registraron datos de deflexión y fuerza para graficar el diagrama esfuerzo vs deformación, con el cual se determinó los módulos de elasticidad y trabajo de cada uno de los materiales. Las ecuaciones para los cálculos se presentan en el Anexo 6. Se tomaron datos de fuerza cada 0,5 mm de desplazamiento del punzón.

2.5.3. ENSAYOS DE IMPACTO

Para el ensayo de impacto se utilizó una máquina de impacto Tinius Olsen modelo IT 504. Para realizar los ensayos se verificó que el martillo de impacto a utilizar sea el adecuado para este tipo de ensayo, luego se calibró la máquina tal y como indica el manual del fabricante. Posteriormente se instaló la probeta en la prensa tipo entenalla de tornillo como se observa en la Figura 2.24.

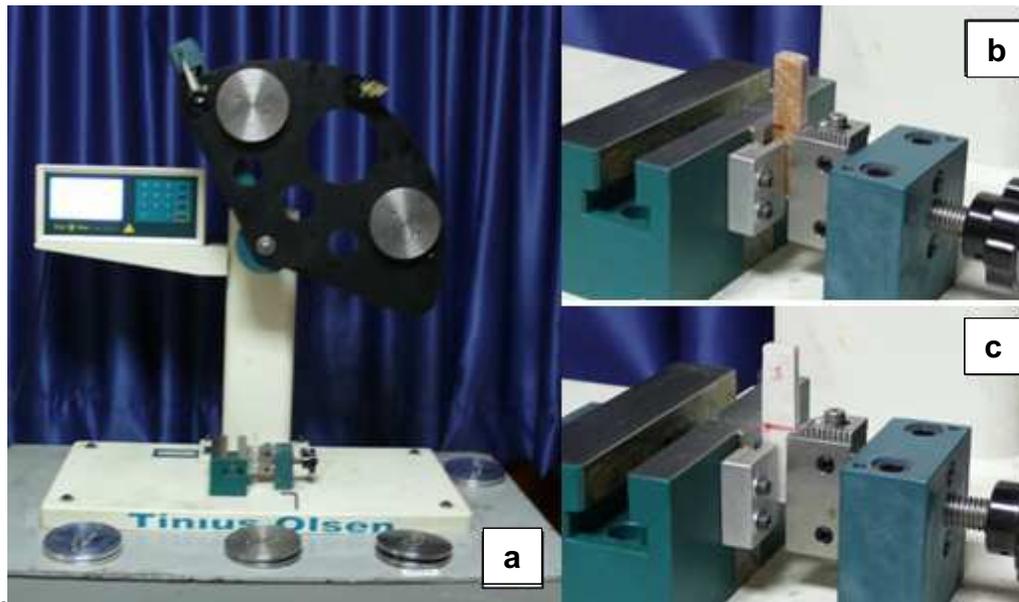


Figura 2.24. Ensayo de impacto: (a) máquina de impacto con su set de pesos; (b) ubicación de la probeta en la entenalla.

Se determinó el peso adecuado del péndulo en el ensayo de impacto de los nuevos materiales como se explica a continuación: primero se estimó la energía necesaria para romper la probeta mediante el péndulo sin el empleo de pesos. Si la probeta permaneció intacta, se agrega el primer par de pesos al péndulo hasta hallar el par que ocasione falla por impacto en la probeta. Seguidamente, se observó la energía máxima que absorbió el material y se comparó con la calibrada en la máquina de ensayos de acuerdo al manual de calibración del fabricante. Si este rango de energía es mayor o igual al 80% de la energía calibrada en la máquina de ensayos, se consideran adecuados los pesos colocados en el péndulo. Finalmente, bajo las condiciones mencionadas anteriormente, se ensayaron a impacto las cinco probetas de material compuesto híbrido. En este caso son cinco probetas el mínimo número recomendado por la norma ASTM D 256-10. En la Figura 2.24 se aprecia la máquina con los pesos en el péndulo.

2.5.4. DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS

La densidad real del material compuesto híbrido se determinó a partir de las láminas de flexión. Se seleccionaron estas láminas porque presentaban dimensiones con mayor uniformidad que las de tracción o impacto. Los datos obtenidos para la determinación de la densidad de las láminas de material

compuesto híbrido fueron: el peso y los espesores promedio de las probetas, las cuales fueron extraídas en distintas partes de las láminas.

$$\delta c_{real} = \frac{m_{comp}}{V} \quad 3$$

$$\delta c_{teórico} = (\delta_{vidrio} * v_{vidrio}) + (\delta_{abacá} * v_{abacá}) + (\delta_{matriz} * v_{matriz}) \quad (g/cm^3) \quad 4$$

$\delta c_{teórico}$ = Densidad del compuesto teórico

$\delta_{abacá}$ = Densidad de la fibra de abacá

δ_{vidrio} = Densidad de la fibra de vidrio

$\delta_{matriz PP}$ = Densidad de la matriz de Polipropileno

δc_{real} = Densidad real del compuesto

$v_{abacá}$ = Fracción volumétrica de la fibra de abacá

v_{vidrio} = Fracción volumétrica de la fibra de vidrio

$v_{matriz PP}$ = Fracción volumétrica de la matriz de polipropileno

m_{comp} = Peso del compuesto

V = Volumen de la lámina

Para encontrar el volumen del compuesto una vez determinado los espesores promedios se calculó el área de la lámina.

Cabe señalar que esta metodología se empleó específicamente para encontrar la densidad real del compuesto, como se detalla en el Anexo 7.

2.6. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para seleccionar el material con las mejores propiedades mecánicas, se utilizó un programa estadístico, el mismo que permitió analizar los resultados obtenidos en la realización de los ensayos de tracción, flexión e impacto. La selección del material compuesto híbrido se hizo comparando las propiedades mecánicas que se obtuvieron al ensayar los compuestos reforzados con abacá, los compuestos reforzados con vidrio y la matriz de PP.

En la selección del mejor material primero se evaluaron las características mecánicas de los compuestos en sus diferentes configuraciones de refuerzo. Estas características fueron el módulo de elasticidad, módulo de trabajo, esfuerzo máximo y deformación. Para esto se utilizaron hojas electrónicas del software Microsoft Excel para el almacenamiento de datos y cálculo. Con esta herramienta se facilitó el cálculo de los promedios de las propiedades ya mencionadas. Además, permitió generar las curvas esfuerzo versus deformación, con las cuales se determinó el módulo de elasticidad y el módulo de trabajo, trazando las pendientes en el primer cuartil y el tercer cuartil respectivamente. En la Figura 2.25 se muestra un ejemplo de las curvas para la determinación de los módulos ya descritos con anterioridad.

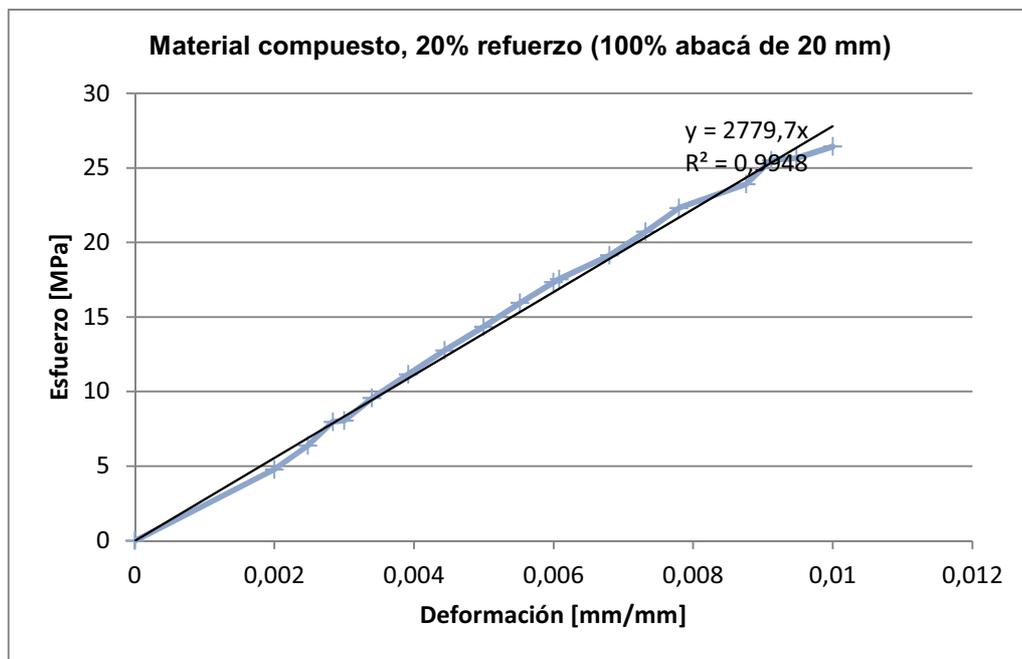


Figura 2.25. Curva esfuerzo vs. deformación de un material compuesto en el que se indica la pendiente de la curva.

Para la selección del material compuesto híbrido con mejores propiedades se hizo un análisis estadístico de los resultados en el programa Statgraphics. En dicho programa se compararon todos los ensayos realizados en los grupos de cada configuración y se determinaron los mejores materiales de cada grupo. Estos resultados fueron comparados con la matriz, el material compuesto reforzado con abacá y el material compuesto reforzado con fibra de vidrio.

Por último, para la selección del mejor material se trabajó con un método de selección de alternativas denominado método de criterios ponderados, el cual se basa en la tabulación de criterios o soluciones. Cada criterio se confronta con los restantes y se asignan valores que luego se suman y ponderan.

2.7. SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO CON EL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

2.7.1. MÉTODOS DE SELECCIÓN DEL PROTOTIPO

Por lo general, para seleccionar entre diversas soluciones (especialmente en la etapa de diseño conceptual) es necesario conocer el orden de preferencia de su evaluación global. Por esta razón, al igual que en la selección del mejor material, se empleó el método corregido de criterios ponderados, que sin la necesidad de evaluar parámetros de cada propiedad y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio, se obtuvo así resultados globales suficientemente significativos.

Para elegir un prototipo primero se consultó acerca de objetos existentes en el mercado fabricados con polipropileno. Estos productos pertenecen a diferentes mercados: (i) mercado deportivo y (ii) mercado decorativo. De estos se eligieron los siguientes prototipos:

- *Mercado Deportivo:* canilleras (o espinilleras) para fútbol y paletas (o manoplas) para natación.
- *Mercado Decorativo:* jaboneras.

En la Figura 2.26 se observan las alternativas para la construcción del prototipo. Estos productos, como ya se mencionó, están fabricados con materiales termoplásticos, en general con polipropileno.

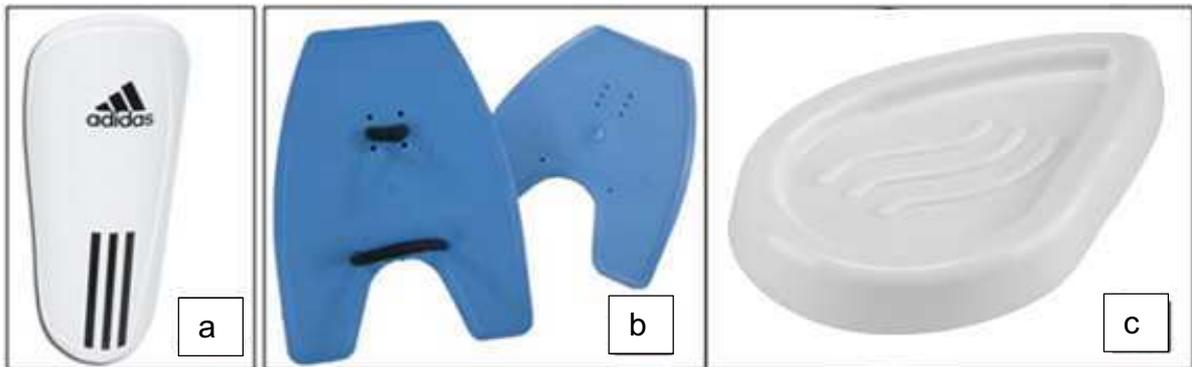


Figura 2.26. Propuestas de prototipos: (a) canillera; (b) manoplas de entrenamiento; (c) jabonera.

Los criterios de ponderación para la selección del prototipo se detallan a continuación:

Facilidad de obtención, ya que el material con el que se fabricará debe ser sometido a moldeo por compresión para dar la forma final del prototipo, debido a que el material compuesto híbrido se lo obtiene en forma de láminas y no es inyectable.

Costo, porque los recursos para la obtención y elaboración del prototipo son limitados.

Funcionalidad, puesto que las propiedades mecánicas y físicas del prototipo deben ser comparadas con un artículo similar existente en el mercado y se desea saber cómo se comporta cuando se le somete a esfuerzos, qué tan resistente es a fuerzas de naturaleza variable (tracción, flexión, impacto).

2.7.2. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez establecido el prototipo y seleccionado los materiales compuestos híbridos para la elaboración del mismo, se diseñó un molde con la forma y las características similares al producto a ser sustituido por los materiales compuestos híbridos elegidos, los planos del molde se aprecian en el Anexo 3. En la Figura 2.27 se presenta el procedimiento seguido para la obtención del prototipo.

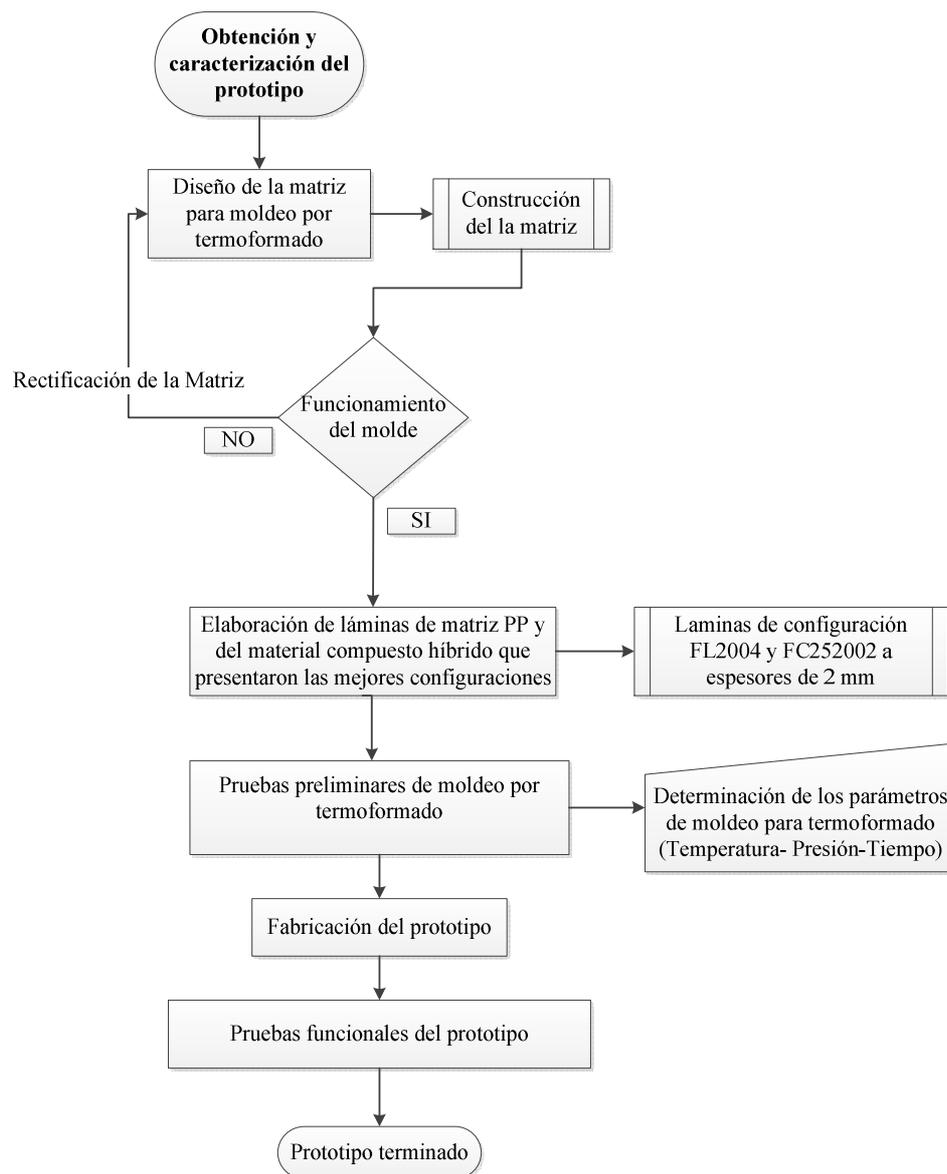


Figura 2.27. Proceso requerido para la obtención de productos de material compuesto híbrido y de polipropileno.

El método para la elaboración del prototipo es el moldeo por termoformado, el cual consiste en precalentar la lámina del material compuesto, que luego es colocada dentro de la matriz para darle forma aplicando una presión moderada. Luego de fabricada la matriz, los pasos a seguir en la elaboración del prototipo son los mostrados en la Tabla 2.12.

Para establecer la temperatura de ablandamiento para la elaboración del prototipo, se experimentó con tres valores de temperaturas y con sus respectivos tiempos. Con este análisis se definió la temperatura adecuada para obtener el

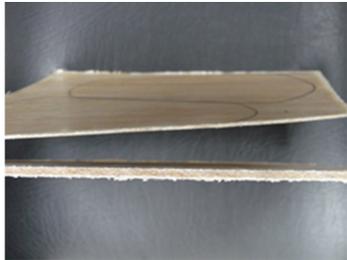
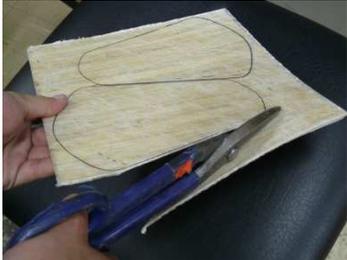
prototipo en buenas condiciones, es decir que esta temperatura no afecte superficialmente al prototipo. En la Tabla 2.11 se describen las temperaturas y tiempos utilizados.

Este prototipo y su contraparte a comparar serán ensayados mediante normas NOCSAE DOC (ND) 090 -06m07 (Método de ensayo y especificación normalizado de desempeño para canilleras de fútbol de nueva fabricación) de ensayo de acuerdo al producto que se seleccionó y cuyos resultados se indican en el apartado 3.5.6.

Tabla 2.11. Prueba de temperaturas y tiempos para elaborar el prototipo.

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo(min)
A	90	10
B	150	6
C	160	5

Tabla 2.12. Descripción del proceso para elaboración del prototipo.

Paso	Descripción del proceso	Observación	Imagen
1	Elaborar láminas de compuesto híbrido.	Mejores configuraciones: <ul style="list-style-type: none"> • FL2004 • FC252002 Las láminas tienen espesores de 2 mm.	
2	Trazar modelo del prototipo en la lámina.	El trazado se lo realiza con un marcador punta fina.	
3	Corte del prototipo.	El corte se lo realizó con una tijera para cortar chapas metálicas.	

Continuación de Tabla 2.12.

Paso	Descripción del proceso	Observación	Imagen
4	Lijado de aristas vivas producidas por el corte.	Se empleó una Lija N°150.	
5	Calentamiento del prototipo en la plancha calefactora.	La temperatura de ablandamiento es de 160°C. El tiempo de ablandamiento es de 5 min.	
6	Ubicación del prototipo en la matriz.	Fijación en las guías para el prototipo.	
7	Aplicación de presión.	Presión de moldeo en 500 psi.	
8	Pegado de fómix.	Se empleó pegamento para poliestireno expandido UHU.	

2.8. CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Para la caracterización del prototipo se utilizó la norma NOCSAE DOC (ND) 090 – 06m07 (Método de ensayo y especificación normalizado de desempeño para canilleras de fútbol de nueva fabricación), la cual se guía en la norma ASTM 1446 (Métodos de ensayo normalizado para equipo y procedimientos utilizados en la evaluación de desempeño de cascos protectores). La norma establece los procedimientos para la caracterización de las canilleras, sus parámetros y las herramientas para la ejecución del ensayo.

2.8.1. METODOLOGÍA PARA ENSAYAR EL PROTOTIPO

Se realizaron ensayos a tres canilleras elaboradas con cada una de las mejores configuraciones de material compuesto híbrido. Para comparar el desempeño de las canilleras, la norma requiere del siguiente equipo: (i) pierna tipo yunque cónica, (ii) impactador esférico de radio 75 mm y con una masa de 5 Kg \pm 0,1. Este ensayo permitió determinar visualmente el efecto del impacto sobre la canillera. Se evaluó el tipo de falla que presenta (rotura o deformación) en comparación con el modelo original al dejar caer el impactador en condiciones de caída libre.

Se impactaron las canilleras en tres zonas distintas: (i) zona de impacto central, (ii) zona lateral de impacto derecha y (iii) zona lateral de impacto izquierda, las cuales son mostradas en la Figura 2.28. Se realizó el ensayo de impacto en el mismo lugar para diferentes canilleras. Finalmente, se elevó el impactador esférico por encima de la canillera sujeta en la pierna de yunque y se la dejó caer directamente sobre ella a la velocidad especificada en la Tabla 2.13 en cada zona seleccionada.

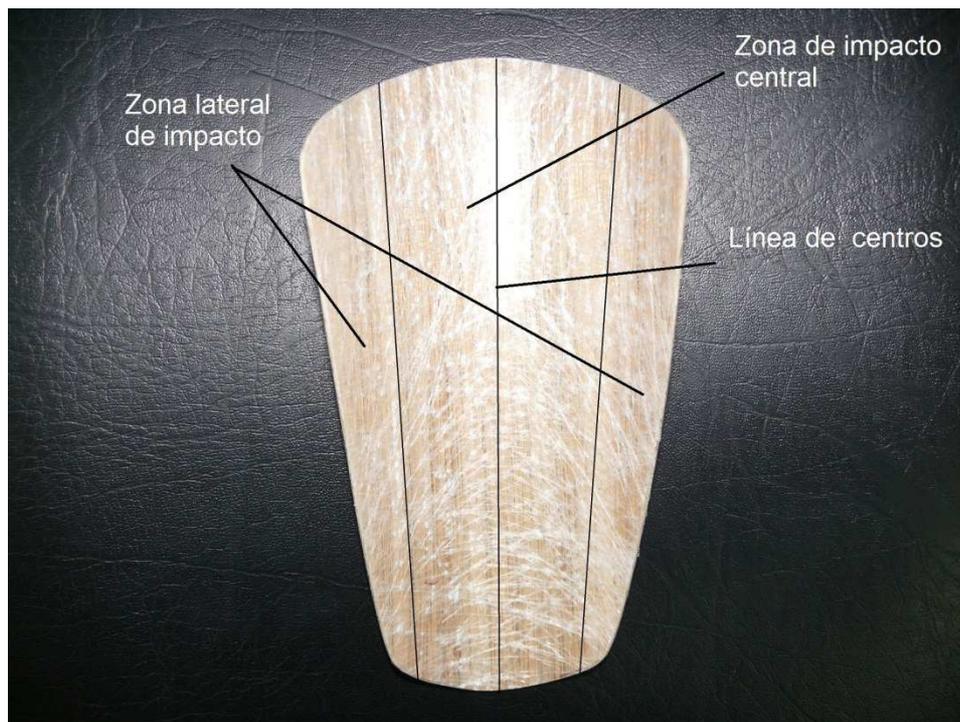


Figura 2.28. Zonas de impacto en la canillera.

Tabla 2.13. Velocidades y alturas de impacto.

	Velocidad (m/s)	Altura (mm)
Zona central	1,73 ± 0,05	150 mm
Zonas laterales	0,75 ± 0,02	30 mm

Para la caracterización del prototipo es necesario indicar que el ensayo se realizó sobre el macho del molde que sirvió como yunque, para corroborar que la canillera después del impacto tuvo o no alguna fractura. Otra técnica que se ocupó para la caracterización fue definir la deformación sufrida por la canillera después del impacto sin emplear el yunque. Esto se hizo mediante la colocación de un pedazo de plastilina (diámetro 25,4 – 28 mm) debajo del área de impacto de la canillera, para luego medir la deformación de la misma. Estos ensayos se presentan en la Tabla 2.14. Se tomaron algunas alturas de impacto superiores e inferiores a las calculadas por las velocidades planteadas por la norma. Finalmente, los resultados obtenidos se compararon con aquellos que mostró la canillera original.

Tabla 2.14. Ensayos de prototipo de acuerdo a norma NOCSAE DOC (ND) 090 –06m07.

Descripción	Condiciones	Fotografía
Ensayo de impacto bajo norma NOCSAE DOC (ND) 090 – 06m07 sin yunque y con plastilina de control para medir deformación luego del impacto.	Impactador esférico de radio 75 mm y con una masa de 5 kg \pm 0,1. Impacto en tres zonas de la canillera. Plastilina de diámetro 25,4 – 28 mm.	
Ensayo de impacto bajo norma NOCSAE DOC (ND) 090 – 06m07.	Alturas de impacto: Zona central: 150 mm. Zona lateral: 30 mm.	

En la Tabla 2.15 se presentan las diferentes alturas tomadas para los ensayos realizados a las canilleras originales y a las canilleras del material compuesto híbrido. Las alturas se midieron desde el punto marcado en la canillera a la esfera del impactador. Cabe citar que los ensayos se ejecutaron desde las alturas menores hacia las mayores. En la Tabla 2.16 se compara el ensayo a las alturas descritas en la norma y el modificado así como también sus condiciones.

Tabla 2.15. Alturas de impacto para ensayar el prototipo.

	Altura de ensayo (mm)		
Zona central	180	150	120
Zonas laterales	60	30	10

Tabla 2.16. Comparación de ensayos a diferentes alturas.

Descripción	Condiciones	Fotografía
<p>Ensayo de impacto bajo norma NOCSAE DOC (ND) 090 – 06m07 con el prototipo sobre el yunque.</p>	<p>Pierna tipo yunque. Impactador esférico de radio 75 mm y con una masa de $5 \text{ kg} \pm 0,1$. Impacto en tres zonas de la canillera.</p>	
<p>Ensayo de impacto modificado con yunque y sin plastilina.</p>	<p>Alturas de impacto: Zona central: 120, 150 y 180 mm. Zona lateral: 10, 30 y 60 mm.</p>	

Se registraron los datos de altura de impacto y diámetro de la plastilina para determinar su deformación. Además, se describió el tipo de falla que presentó la canillera producto del impacto contra el yunque a las alturas mencionadas en la tabla anterior.

2.8.2. MÉTODO DE ENSAYO ALTERNO

Se planteó un método de ensayo alternativo para el prototipo, debido a que al realizar las pruebas con la norma del ensayo anterior no se visualizaron fallas. El objetivo de este ensayo fue visualizar el daño que produce la energía transmitida por el impactador al fómix. Con esto se pudo evidenciar cuan dañino puede resultar el impacto en el material y de esta manera para verificar si cumple su función de proteger a la pierna de un jugador. Este nuevo ensayo empleó un impactador, constituido por una esfera de acero de 533 g y 51 mm de diámetro. Se varió la altura como se muestra en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Ensayo alternativo con esfera de acero.

Descripción	Condiciones	Fotografía
<p>Ensayo con impactador de acero con el prototipo sobre el yunque.</p>	<p>Esfera de acero de 533 g y 51 mm de diámetro. Altura: 180 mm.</p>	
<p>Ensayo con impactador de acero directamente en el fómix.</p>	<p>Esfera de acero de 533 g y 51 mm de diámetro. Altura: 180 mm.</p>	

Continuación de Tabla 2.17.

Descripción	Condiciones	Fotografía
Ensayo con impactador de acero con prototipo sobre el yunque.	Esfera de acero de 533 g y 51 mm de diámetro. Altura: 1000 mm.	
Ensayo con impactador de acero directamente en el fómix.	Esfera de acero de 533 g y 51 mm de diámetro. Altura: 1000 mm.	

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de la fabricación de materiales compuestos híbridos. Se presentan los parámetros que se estudiaron en el capítulo anterior y que sirvieron para obtener láminas de material compuesto híbrido sin defectos. Seguidamente, se analizan los resultados de la caracterización mecánica efectuada a las probetas de compuesto híbrido. Por último, se muestra un análisis de los resultados de la selección del material que presentó las mejores propiedades mecánicas, así como también la elaboración del prototipo.

3.1. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el análisis experimental realizado a la fibra de abacá y a la matriz, con los cuales se elaboraron láminas de material compuesto híbrido libre de defectos. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el desempeño del molde. Para ello se elaboraron láminas de polipropileno y de material compuesto, para luego evaluar visualmente las imperfecciones y defectos superficiales.

3.1.1. DESEMPEÑO DEL MOLDE

Las pruebas preliminares para evaluar el desempeño del molde se realizaron de acuerdo con el procedimiento descrito en el acápite 2.2.1. Con estas pruebas se establecieron los lugares del molde por donde se produjeron fugas de material al aplicar presión. Estos lugares fueron las uniones entre las piezas del molde, tales como las uniones del marco y entre la placa base y el marco, como se muestra en la Figura 3.1. En la Tabla 3.1 se presenta el porcentaje de pérdidas en peso de matriz polipropileno en función de las presiones de moldeo de las pruebas A, B y C.



Figura 3.1. Fugas de PP por las uniones del molde.

Tabla 3.1. Porcentaje de pérdidas en peso de PP en función de la presión de moldeo.

Prueba	Fuerza aplicada en la prensa [lbf]	Presión que ejerce la placa de Aluminio [psi]	Pérdidas material [% peso]
A	12000	156	20
B	8000	104	10
C	7000	91	5

La mayoría de pérdidas se produjeron entre el macho y la hembra. Las pérdidas a la presión de 91 psi equivalen al 5% del peso total de material colocado en el molde, como lo reveló la prueba C. Al observar polipropileno filtrar por la unión macho-hembra del molde, se asegura que exista una distribución homogénea del PP en el molde y que éstas pérdidas son mínimas. Para las presiones de 156 y 104 psi correspondientes a las pruebas A y B respectivamente, existieron mayores pérdidas en peso de material PP.

Para corregir las pérdidas de peso en las láminas, causadas por las fugas existentes en el molde, se colocó un porcentaje adicional de material para su elaboración, el mismo que corresponde al porcentaje de pérdidas que se dieron en la prueba C. Es decir, se añadió el 5% de material extra. Además, se tomaron acciones correctivas que consistieron en procesos de maquinado en las uniones

marco - base del molde. La temperatura a la que se elaboraron las láminas fue 185°C, la cual se obtuvo de la ficha técnica del fabricante del polipropileno.

Las pruebas preliminares permitieron determinar los parámetros de moldeo como la presión y temperaturas adecuadas para la elaboración de láminas de PP. Además, se apreciaron las diferentes fallas o defectos en las láminas de matriz polipropileno y material compuesto, tales como burbujas internas de aire. Algunas de estas se encontraron en forma de estrellas pequeñas y alineadas, lo que indica que son líneas de flujo del PP debido a la aplicación rápida de presiones altas de moldeo. En el caso del material compuesto reforzado con fibra de abacá se apreciaron burbujas alrededor de las fibras. Estos problemas se dieron al trabajar con las presiones más altas, pero disminuyeron al trabajar con una presión de 91 psi. Lo expuesto se indica en la Tabla 3.2 para los dos casos mencionados.

Tabla 3.2. Condiciones de pruebas preliminares para determinación del desempeño del molde.

	Condiciones	Observaciones	Fotografía
1	Láminas de matriz polipropileno Temperatura = 185°C Presión moldeo = 91 [psi] espesor = 1 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de burbujas en toda la superficie de la lámina. • Pérdida de material igual al 5%. 	
2	Material compuesto al 5% de refuerzo de fibra de abacá corta de 1 cm Temperatura = 185°C Presión moldeo= 91 [psi] espesor ≈1,6 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de burbujas alrededor de la fibra. • Espacios vacíos en la lámina por el bajo porcentaje de refuerzo. • Distribución no homogénea de la fibra. • Pérdida de material = 5%. 	

De acuerdo a los resultados indicados en la tabla anterior, los parámetros de la condición 1 sirvieron para la elaboración de material compuesto al 5% de refuerzo de fibra de abacá esparcida al azar, la misma que corresponde a la condición 2. Es decir, al elaborar el material compuesto con 5 vol% de refuerzo y observar que se presentaron burbujas internas alrededor de las fibras, se plantearon hipótesis sobre su origen, por ejemplo, la humedad en las fibras y/o en los pellets de matriz PP, o la aplicación abrupta de presión.

Los problemas de burbujas alrededor de las fibras se dieron en todas las láminas aunque en menores proporciones conforme se fueron probando los diferentes ensayos.

3.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PREPARACIÓN DE LA FIBRA DE ABACÁ

Se elaboraron nuevas láminas de material compuesto con los parámetros de moldeo establecidos en el acápite 2.3.1 pero con un porcentaje volumétrico de refuerzo del 25%, que representa la máxima cantidad de refuerzo propuesto en este proyecto. Estas nuevas láminas fueron elaboradas con fibra de abacá sin secar y mediante una inspección visual se observaron burbujas internas de aire alrededor de la fibra de abacá, además en ciertas zonas de la lámina existían fibras no protegidas por la matriz como se puede observar en la Figura 3.2. La presencia de burbujas podría ser causante de fracturas en el material al realizar los ensayos mecánicos normalizados [1].

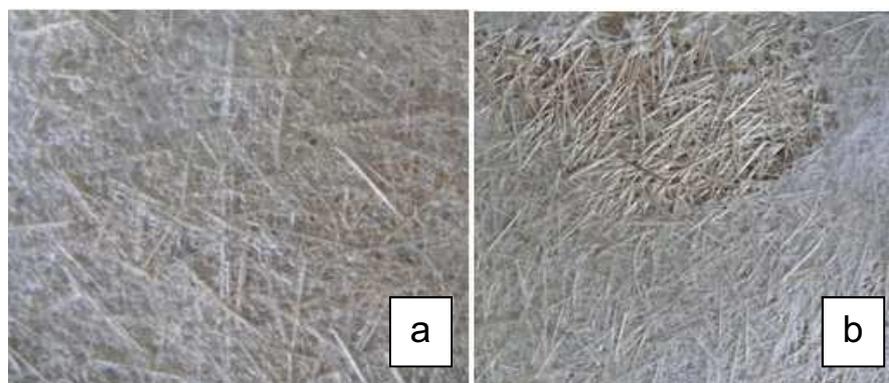


Figura 3.2. Material compuesto reforzado con fibra de abacá: (a) Burbujas internas alrededor de las fibras y (b) Fibra expuesta – defecto superficial.

Con el fin de definir las causas de la presencia de burbujas se realizaron pruebas para determinar el porcentaje de humedad de las fibras naturales de acuerdo con el procedimiento planteado en el acápite 2.2.2.1. (Preparación de fibras de abacá).

Los resultados del porcentaje de humedad fueron obtenidos en el analizador de humedad. Previo a este análisis, se realizaron los ensayos A, B y C, los mismos que consistieron en secar la fibra de abacá a diferentes temperaturas y con tiempos de duración correspondientes para cada ensayo. Estos parámetros, al igual que los pesos finales después de la extracción de humedad se aprecian en la Tabla 3.3. El porcentaje de humedad que se indica a continuación corresponde al valor obtenido de humedad remanente en las fibras de abacá que mostró el analizador de humedad Ohaus MB 45. El contenido de humedad de la fibra sin secar se determinó con el analizador mencionado anteriormente.

Tabla 3.3. Porcentaje de humedad de la fibra de abacá.

Ensayos	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% de humedad
A	90	12	3,0001	2,686	1,45%
B	80	6	3,0002	2,708	2,21%
C	70	2	2,9169	2,671	2,17%
D	0	0	3,0005	-	10,30%

De acuerdo con los resultados porcentuales, los procedimientos de secado aplicados a la fibra de abacá permitieron extraer humedad de la fibra, en un rango entre 8,09 y 8,85 %. La fibra de abacá que se obtuvo al término de los procesos de secado A y B presentó afectaciones físicas y degradación. Estos defectos se observan en la Figura 3.3, al compararlas con la fibra sin secar (proceso D).



Figura 3.3. Comparación física de la fibra de abacá después del secado ensayos A, B y D (fibra sin secar).

Al aplicar el tratamiento de secado “C”, se observó que las fibras obtenidas de un proceso de secado a menor temperatura y menor tiempo de exposición dentro de la estufa fueron menos frágiles y no se observó degradación. En conclusión, al realizar el tratamiento de secado de la fibra de abacá a 70°C durante 2 horas, permitió extraer un 2,17% de humedad sin afectar las propiedades de las fibras. En la Figura 3.4 se aprecia la comparación visual entre las fibras obtenidas con el proceso “C” y la fibra sin secar “D”.

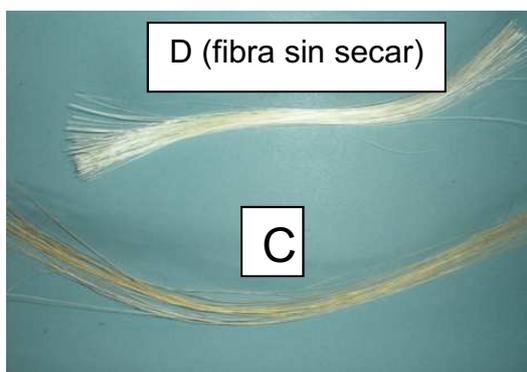


Figura 3.4. Comparación física de la fibra de abacá después del secado (ensayo C) y la fibra sin secar.

Las láminas de matriz polipropileno obtenidas en las pruebas preliminares fueron inspeccionadas visualmente para determinar la presencia de burbujas y los diferentes defectos existentes que se ilustran en la Figura 3.5. Al inspeccionar estos defectos se planteó una hipótesis de que las burbujas podrían ser producidas por humedad en los pellets a nivel superficial absorbida del ambiente.

Por esta razón, se realizó un análisis de humedad para determinar el porcentaje de agua contenida en los pellets.



Figura 3.5. Lamina de PP con defectos de burbujas internas y líneas producidas por el flujo del material.

En la Figura 3.6 se aprecia el resultado del ensayo realizado en el analizador de humedad a los pellets de PP, el mismo que entregó un resultado de 0.00% de humedad. También se puede apreciar que el peso inicial fue 30,39 g, antes y después del ensayo y el tiempo de duración fue de 1,31 minutos.



Figura 3.6. Ensayo realizado en el analizador de humedad a los pellets sin secar.

Con este resultado se concluyó que los pellets de polipropileno PH1310 no son higroscópicos (no absorben humedad) por lo que no es esta la causa de la

presencia de burbujas en las láminas obtenidas. Por esta razón se realizaron pruebas a diferentes presiones de moldeo para determinar si ésta era la causante de los defectos. Los resultados de estos ensayos se muestran en el acápite 3.2.

3.2. ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN

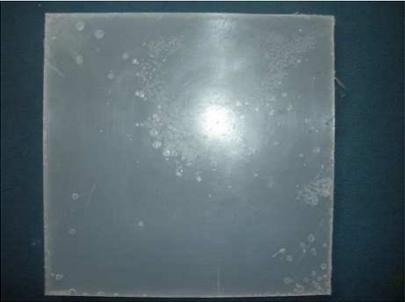
La definición de los parámetros del proceso de moldeo por compresión se realizó de acuerdo con el procedimiento planteado en el acápite 2.3.1. Se definieron las temperaturas, presiones y tiempos ocupados para cada una de las fases de moldeo. De estos ensayos se escogieron las condiciones a las cuales se obtuvieron láminas con menor cantidad de defectos (disminución considerable de burbujas).

En la fase de precalentamiento se establecieron la temperatura de la prensa calefactora y el tiempo de precalentamiento, en los cuales se logró la fusión completa de los pellets de polipropileno. Estos valores fueron de 185°C y 20 minutos, respectivamente, los cuales se definieron en la elaboración de láminas de matriz PP para el desempeño del molde. La temperatura fue la determinada en la placa macho del molde y se midió con la termocupla tipo J. En esta fase no se aplicó presión.

En la fase de moldeo se hicieron pruebas a varias presiones, como se muestra en la Tabla 3.4. Se observó que al elaborar láminas de matriz polipropileno con una presiones de 70 y 90 psi existieron pérdidas de material, razón por la cual se obtuvieron láminas con espesores inferiores a los requeridos en las normas (tracción: $2,5 \pm 0,10$ mm; flexión: $4 \text{ mm} \pm 0,16$; impacto: $6,35 \pm 0,16$ mm) y con gran cantidad de burbujas internas, como se puede apreciar en la fotografía (fila A) de la Tabla 3.4.

Para las láminas de matriz polipropileno obtenidas con valores de presión entre 23 y 35 psi se obtuvieron mejores resultados: eliminación de las burbujas internas, distribución homogénea del material en el molde, menor cantidad de pérdidas de material, como se observa la Tabla 3.4 (fila B).

Tabla 3.4. Láminas de matriz polipropileno procesadas a diferentes valores de presión.

	Condiciones	Observaciones	Fotografía
A	Láminas de matriz polipropileno Temperatura = 182°C Presión moldeo = 90 y 70 psi espesor = 1 mm	Presencia de burbujas debido a la aplicación de alta presión. Este tipo de defectos se dio en las láminas al aplicar las presiones ya mencionadas.	
B	Láminas de matriz polipropileno T = 182°C Presión moldeo = 23 y 35 psi espesor = 1 mm	Presencia de muy pocas burbujas debido a la aplicación de presión muy rápida. Pero esta lámina si ayuda a la obtención del material compuesto.	

En conclusión, después de analizar estos resultados se fijó como presión de moldeo para la obtención de láminas de polipropileno 23 psi, a una temperatura de 182°C (360°F) durante un tiempo de 5 min, el mismo que se mide una vez que la placa macho alcanza la temperatura señalada.

Uno de los problemas que se presentaron en la determinación de estos parámetros fue que la matriz polipropileno se puede degradar cuando es expuesta a temperaturas elevadas durante tiempos prolongados. Se observó una degradación del material a temperaturas superiores a 182°C que se presentó como una coloración blanquecina (no transparente). esta degradación también se dio cuando se mantuvo la temperatura a 182°C durante tiempos de exposición de 20 a 35 min. En la Figura 3.7 se pueden observar dos láminas de polipropileno obtenidas a 23 psi pero con diferentes tiempos de moldeo.

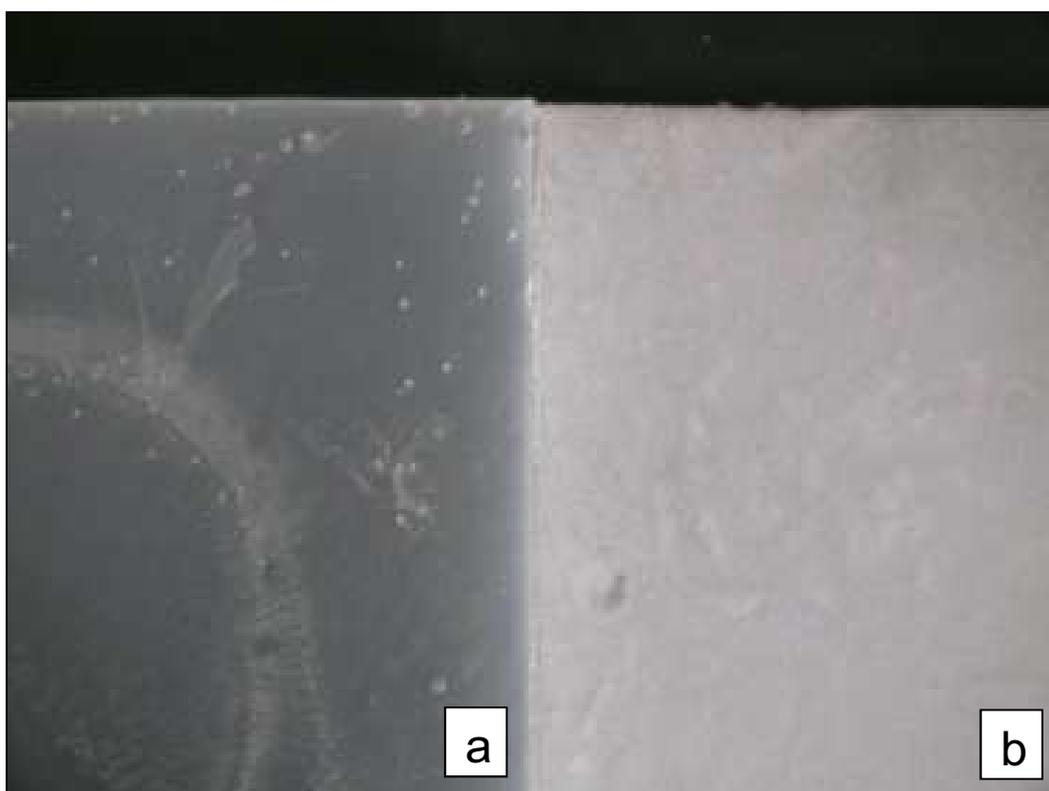
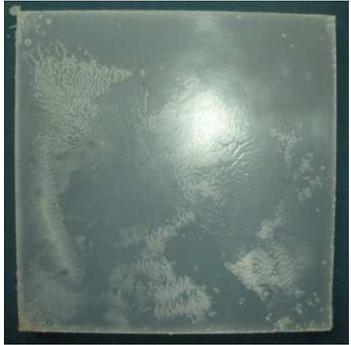


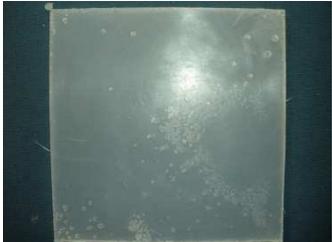
Figura 3.7. Láminas de matriz polipropileno degradada y no degradada a una presión de 23 psi. a) Tiempo de exposición a la temperatura 5 min; b) Tiempo de exposición a la temperatura 35 min (material degradado).

Para determinar las condiciones de enfriamiento más adecuados se moldearon láminas de polipropileno a 185°C y 26 psi. En la Tabla 3.5 se muestran las condiciones de enfriamiento a las que fueron sometidas las láminas, así como también algunas observaciones de los defectos producidos a causa de las diferentes condiciones de enfriamiento aplicadas a las láminas de PP.

Tabla 3.5. Láminas obtenidas de la matriz de polipropileno después de aplicar los diferentes procesos de enfriamiento.

	Condiciones	Observaciones	Fotografía
A	Enfriamiento al ambiente $T_{\text{ambiente}} = 18^{\circ}\text{C}$ $t = 20 \text{ min}$	Existen pequeñas burbujas internas en toda la lámina y en la parte central se observan líneas de flujo producidas por el materia.	

Continuación de la Tabla 3.5.

	Condiciones	Observaciones	Fotografía
B	Enfriamiento con agua a $T_{\text{agua}} = 12^{\circ}\text{C}$ $t = 2 \text{ min}$	Después de la extracción del molde, las láminas flejaron por el enfriamiento brusco. Además, se observaron burbujas.	
C	Enfriamiento con presión (13 psi) y a temperatura ambiente $t = 12 \text{ min}$	Los resultados mejoraron, disminuyó notablemente la cantidad de burbujas y se mantuvo la lámina completamente plana.	

Al enfriar las láminas a temperatura ambiente sin aplicación de presión se observaron diversas imperfecciones como son las burbujas internas de aire en toda la extensión de las láminas, así como líneas de flujo. En el enfriamiento con agua a temperatura ambiente, al ser extraídas del molde, las láminas se flejaron y presentaron cierta fragilidad debido al enfriamiento brusco. Al aplicar presión durante el enfriamiento se obtuvieron mejores resultados. Así, al aplicar una presión de 13 psi durante 15 minutos las láminas presentaron un buen acabado superficial libre en un 90% de burbujas internas y otros defectos. Cabe señalar que al realizar el enfriamiento con presiones de 20 y 26 psi se obtuvieron pérdidas del material por el exceso de presión.

Después de analizar estos resultados se definieron los parámetros adecuados de temperatura y tiempo para cada una de las fases de moldeo para obtener láminas de matriz polipropileno libre de defectos. Estas fases se representan en la Figura 3.8.

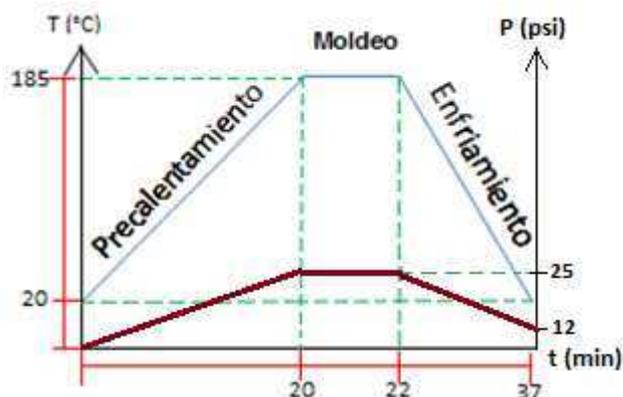


Figura 3.8. Fases de moldeo por compresión

La fabricación de las láminas de matriz polipropileno se realizó con los parámetros que se describen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Parámetros de moldeo por compresión para obtener láminas de PP.

Fase	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Presión (psi)
Prealentamiento	185	20	0
Moldeo	185	2	26
Enfriamiento	20 (Ambiente)	15	12

3.3. CONFORMACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON FIBRA DE ABACÁ

Para conformar el material compuesto reforzado con fibra de abacá, se aplicaron los parámetros establecidos para la obtención de láminas de matriz polipropileno en el acápite anterior. Estos mismos parámetros permitieron obtener láminas de material compuesto libres de defectos, como se observa en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Lámina de material compuesto libre de defectos.

El porcentaje de refuerzo fue calculado a partir de la fracción volumétrica nominal, como se indica en el Anexo 4. En la elaboración de láminas de material compuesto se tuvo una distribución uniforme de la fibra de abacá de 10 mm. Sin embargo, con la fibra de 20 mm se tuvo dificultad al esparcirla en el área del molde dado que la fibra se aglomera. Para solucionar este problema se escogieron las fibras, se retiraron los residuos fibrosos y pilosidades, antes de cortarlas. Este procesamiento reemplazó al tamizado realizado para las fibras de 10 mm. En el caso de la fibra continua se cortaron fibras de abacá de 250 mm retirando los residuos fibrosos.

Uno de los inconvenientes durante el proceso fue que el excesivo desperdicio de material PP ocasionó que la fibra quede desprotegida como se observa en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Pérdida excesiva de matriz en el material compuesto quedando desprotegida la fibra.

Condiciones y parámetros	Observaciones	Fotografía
Material compuesto al 20% refuerzo de fibra corta $T_{\text{precalentamiento}} = 188^{\circ}\text{C}$, $M_{\text{moldeo}} = 68 \text{ psi}$, $t_{\text{moldeo}} = 10 \text{ min}$, $e = 2 \text{ mm}$	Falta de homogeneidad y distribución de la matriz polipropileno debido a fuga en el material PP. La fibra empezó a degradarse.	

Otro inconveniente que se presentó fue la degradación de la fibra al exponerla a altas temperaturas. Elevar la temperatura en la prensa calefactora con el objetivo de disminuir el tiempo de la fase de precalentamiento hizo que las fibras se degraden y aumente la cantidad de burbujas, como se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Degradación de la fibra en el material compuesto debido a la elevada temperatura.

Condiciones y parámetros	Observaciones	Fotografía
Material compuesto al 20% de refuerzo de fibra corta $T_{\text{precalentamiento}} = 205^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{moldeo}} = 68 \text{ psi}$, $t_{\text{moldeo}} = 10 \text{ min}$, $e \approx 2 \text{ mm}$	Debido a la alta temperatura y a un mayor tiempo de moldeo la fibra se degradó y existió mayor presencia de burbujas.	

Un factor muy importante para obtener una lámina libre de defectos y con una distribución homogénea de la fibra, fue el tamizado de las fibras en un tamiz ASTM N° 10 (para las fibras corta de 10 mm). Así se eliminaron todos los residuos fibrosos y pilosidades de la fibra, lo que contribuyó a que exista una buena adhesión de la fibra con la matriz. En la Tabla 3.9 se puede observar la lámina de material compuesto reforzado al 20% con fibra de abacá corta de 10 mm y libre de defectos.

Tabla 3.9. Material compuesto reforzado con fibras de abacá libre de defectos.

Condiciones y parámetros	Observaciones	Fotografía
Material compuesto al 20% de refuerzo de fibra corta (10 mm) $T = 185^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{moldeo}} = 25 \text{ psi}$ $t_{\text{moldeo}} = 2 \text{ min}$ espesor = 2,3 mm Presión prensa fría = 13 psi	Los defectos de burbujas constituyen aproximadamente un 5%, no hay degradación de la fibra y existe una fuerte unión en la interfaz fibra - matriz. Fibra tratada a $70^{\circ}\text{C} / 2 \text{ h}$ Índice de fluencia del polímero = $13 \text{ g}/10 \text{ min}^{12}$	

A continuación, en la Tabla 3.10 se muestran defectos que se presentaron en la obtención de materiales compuestos con fibras continuas (250 mm) como refuerzo. En el ensayo A se puede apreciar que al trabajar con altas presiones de

¹² Hoja técnica PP PH1310 marca Petroquim.

moldeo (equivalentes a 70 psi), el material compuesto presentó áreas con una mala distribución de refuerzo y desorientación de la fibra. En el ensayo B se pudo observar que al elevar la temperatura a 188°C y al aumentar la presión de moldeo, existió una degradación de las fibras y en algunas secciones el refuerzo no estaba protegido por la matriz. Además, las fibras estaban desorientadas.

Tabla 3.10. Otros defectos y parámetros bajo los cuales se presentaron.

Condiciones y parámetros	Observaciones	Fotografía
Material compuesto al 20 vol% de refuerzo de fibra continua (250 mm) $T_{\text{precalentamiento}} = 185^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{moldeo}} = 70 \text{ psi}$ $t_{\text{moldeo}} = 5 \text{ min}$ $e = 2,3 \text{ mm}$	Las burbujas disminuyeron en comparación con el material de fibra corta, aparecieron zonas con falta de refuerzo.	
Material compuesto al 20 vol% de refuerzo de fibra continua (250 mm) $T_{\text{precalentamiento}} = 188^{\circ}\text{C}$ y una $P_{\text{moldeo}} = 90 \text{ psi}$ $t_{\text{moldeo}} = 5 \text{ min}$ $e = 2,3 \text{ mm}$	La fibra se degradó (se quemó) con una presencia masiva de burbujas.	

3.4. ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

El material compuesto híbrido fue obtenido mediante el proceso establecido para los compuestos reforzados con fibra de abacá. Se utilizaron los mismos parámetros establecidos en los acápites 2.3.1 y 2.3.2, con la diferencia de que para el compuesto híbrido fue necesario modificar los valores de la presión de enfriamiento de tal manera que se pudo asegurar el espesor recomendado por la norma ASTM D 3039/3039M-08. Estos valores de presión se encuentran en un rango de 25 a 40 psi aproximadamente. Las láminas de material compuesto y de material compuesto híbrido fueron elaboradas con fibra de abacá secada a 70°C por un tiempo de 2 horas para el caso de fibras cortas, la misma que corresponde al ensayo C de la Tabla 3.3.

El tratamiento de humedecido y secado de las fibras continuas, que se explicó en el acápite 2.2.2.1 permitió que éstas mantengan una forma alisada, lo cual facilitó su distribución en el molde durante la fabricación del material compuesto híbrido. Las temperaturas y tiempos de secado para las fibras se aprecian en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Parámetros de secado de las fibras de abacá.

	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Humidificación
Fibra 10 mm	70	2	No
Fibra 20 mm	70	2	No
Fibra 250 mm	70	12	Si

Para la obtención de láminas de compuesto híbrido con porcentajes volumétricos muy altos de refuerzo, por ejemplo el de 25 vol% (50% de fibras de vidrio y 50% de fibras de abacá) se observó que en zonas de la lámina el refuerzo no quedó completamente protegido por la matriz PP, como se observa en la Tabla 3.12. Este problema se presentó por la excesiva aplicación de presión (78 psi) y el porcentaje de pérdidas de la matriz fue del 15% en peso. Para corregir este problema se realizó un nuevo ensayo disminuyendo la presión a 35 psi, lo cual dio como resultado una buena protección de la matriz al refuerzo como se aprecia en la Figura 3.10.

Tabla 3.12. Parámetros y defectos en el material compuesto híbrido refuerzo 50V/50A.

Condiciones y parámetros	Observaciones	Fotografía
Refuerzo (25%): 50% fibra de vidrio 50% fibra de abacá Temperatura de 185°C presión de 70 psi tiempo de moldeo = 5 min espesor = 2,9 mm	Se observó que en partes de la lámina, la fibra de vidrio no estuvo completamente protegida.	



Figura 3.10. Lámina de material híbrido reforzado con 25 vol% de fibras (50% vidrio y 50% abacá).

Para apreciar visualmente la diferencia entre compuestos híbridos a diferentes configuraciones, en la Tabla 3.13 se presenta la comparación entre una lámina de material compuesto híbrido al 50%/50% y otra al 25%/75% en refuerzo respectivamente.

Tabla 3.13. Comparación de dos láminas de material compuesto híbrido a diferentes fracciones volumétricas.

Condiciones y parámetros	Observaciones	Fotografía
Refuerzo de las láminas al 20% $T_{\text{procesamiento}} = 182^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{moldeo}} = 35 \text{ psi}$ $t_{\text{moldeo}} = 2 \text{ min}$ espesor $\approx 2,7 \text{ mm}$	A la izquierda se tiene una lámina: 25% fibra de vidrio 75% fibra de abacá. A la derecha se tiene una lámina: 50% fibra de vidrio 50% fibra de abacá.	

Una vez obtenidas las láminas con todas las configuraciones establecidas para el presente proyecto, se extrajeron probetas de las mismas para sus respectivos ensayos. Las láminas elaboradas corresponden a lo planteado en el acápite 2.4, es decir, para los ensayos de tracción, flexión e impacto.

3.4.1. PROBETAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

En la preparación de probetas para tracción se enfatizó en el acabado en los extremos. Estos tuvieron un acabado fino libre de rugosidades con el objetivo de eliminar posibles concentradores de esfuerzos producidos por los cortes realizados con la sierra. En las siguientes figuras se muestran las probetas de material compuesto híbrido de frente, de perfil, y a contra luz; esta última con el objetivo de apreciar la distribución de la fibra de abacá.

En la Figura 3.11a se muestra el compuesto híbrido FL2004 (20 vol% de refuerzo, 75% de fibra continua de abacá y 25% de fibra de vidrio). Las fibras de abacá se ven a simple vista debido al bajo porcentaje de refuerzo de vidrio, además se observa la adecuada alineación de la fibra natural en la matriz. En la Figura 3.11b se aprecia la simetría existente entre las fibras protegidas por la matriz. Además, en la Figura 3.11c se observa que la fibra conserva una correcta distribución y alineación en la matriz.



Figura 3.11. Probeta para ensayo de tracción con fibra longitudinal orientada unidireccionalmente al 20 vol% de refuerzo (75% abacá / 25% fibra de vidrio).

En la Figura 3.12a se aprecian probetas reforzadas con fibras cortas correspondiente al material FC202004 (20 vol% de refuerzo, 75% de fibra de abacá y 25 % de fibras de vidrio). En la Figura 3.12b se observa una buena distribución de la matriz por la fibra de vidrio y en la Figura 3.12c la distribución de la fibra de abacá en la matriz.

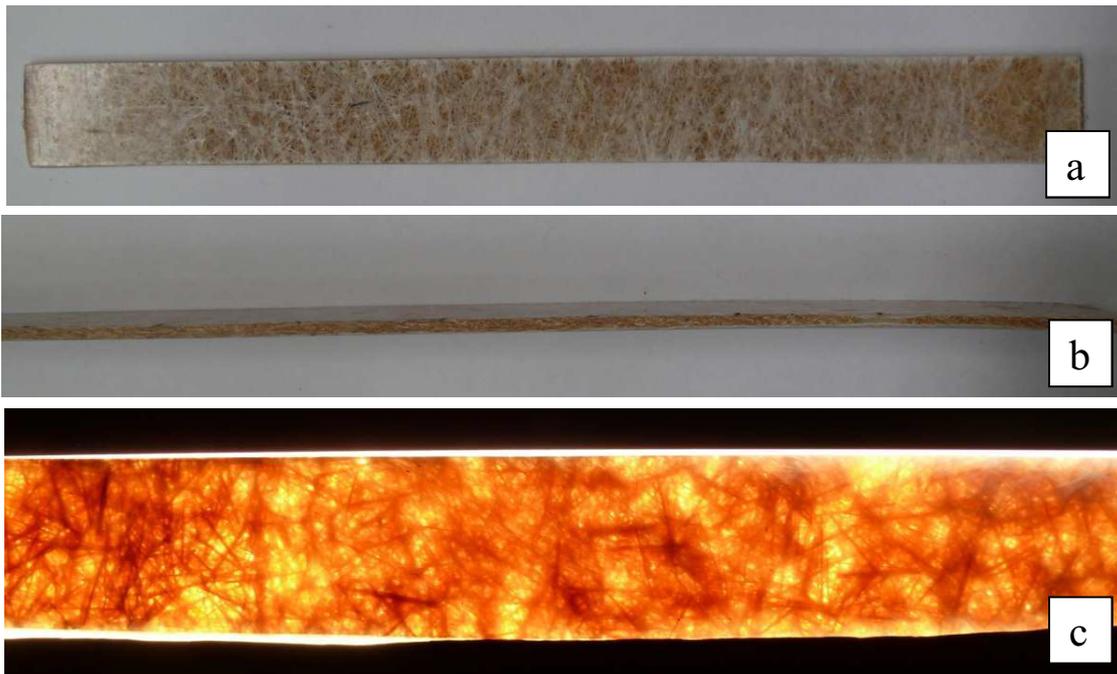


Figura 3.12. Probeta para ensayo de tracción al 20 vol% de refuerzo con fibra corta de abacá de 20 mm y 25% de fibra de vidrio.

3.4.2. PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN

Para las probetas de flexión se destacó que el acabado en los bordes de las mismas tengan terminados finos libres de asperezas, con el objetivo de eliminar posibles concentradores de esfuerzos producidos por los cortes realizados con la sierra. Aquí también se controló el ancho de la probeta debido a que sus tolerancias son mínimas. Al igual que en los ensayos de tracción en las figuras se apreciará a las probetas de material compuesto híbrido retratadas de frente, de perfil, y a contra luz, con el objetivo de apreciar la distribución de la fibra de abacá. Cabe señalar que esta última no permitió apreciar con claridad la distribución de la fibra continua ni corta.

En la Figura 3.13c, se representa el material compuesto FC252004 (25 vol% de refuerzo, 75% de abacá y 25% de fibra de vidrio), que corresponde al de fibra corta de 20 mm. Se aprecia una distribución homogénea de la fibra natural en toda la sección de la probeta.



Figura 3.13. Probeta para ensayo de flexión al 25 vol% de refuerzo con fibra corta de abacá de 20 mm y 25% fibra de vidrio.

En la Figura 3.14c, al igual que en la anterior, se aprecia las probetas de flexión reforzadas con fibra continua de abacá. Este material corresponde a la configuración FL2503 (25 vol% de refuerzo, 50% de fibra continua de abacá y 50% de fibra de vidrio) y se observa una distribución homogénea de las fibras de abacá, así como una buena alineación de las mismas.





Figura 3.14. Probeta para ensayo de flexión al 25 vol% de refuerzo híbrido de 50% de fibra de abacá longitudinal unidireccional y 50% fibra de vidrio.

3.4.3. PROBETAS PARA ENSAYOS DE IMPACTO

Para las probetas de impacto se enfatizó que sus medidas sean las adecuadas. Una vez cortadas, se ajustaron las dimensiones mediante el lijado de sus extremos, garantizando que no queden con ningún concentrador de esfuerzos. Las probetas que se aprecian en la Figura 3.15 corresponden a la configuración FL2004, en la Figura 3.15b se observa la distribución tipo sánduche y la simetría existente entre las fibras y la matriz.



Figura 3.15. Probeta de impacto al 20 vol% de refuerzo de fibra de abacá longitudinal unidireccional (25% fibra de vidrio / 75% abacá)

En la Figura 3.16a se observa que en la superficie de la probeta no se puede apreciar con claridad la fibra de abacá debido al alto porcentaje de fibra de vidrio. Estas probetas corresponden a la configuración FC252003 (25 vol% de refuerzo de fibra corta de abacá de 20 mm 50% abacá / 50% fibra de vidrio), en la Figura 3.16b se observa la distribución tipo sánduche de las fibras y el polipropileno.



Figura 3.16. Probeta de impacto al 25 vol% de refuerzo de fibra corta de abacá de 20 mm (50% abacá / 50% fibra de vidrio).

3.5. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

Luego de ensayar las probetas obtenidas de acuerdo a los procedimientos descritos en el acápite 2.4 de este proyecto, se muestran a continuación los resultados obtenidos.

Las propiedades mecánicas que se determinaron en este estudio fueron: esfuerzo máximo, módulos de elasticidad y deformaciones, tanto a tracción como a flexión, así como también su resistencia al impacto. Con los datos obtenidos de la caracterización de las probetas en sus diferentes configuraciones, se realizó la comparación de las propiedades mecánicas en el programa STATGRAPHICS Centurion XV versión 15.2.06. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) y el método de las diferencias menos significativas de Fisher (LSD) cuando las distribuciones muestrales fueron aproximadamente normales. El tipo de comparación efectuado fue el conocido en el programa como: comparaciones para muestras múltiples. Los análisis estadísticos indicados tienen un nivel de confianza del 95% debido al tamaño pequeño de las muestras. Este análisis estadístico determinó que configuraciones son estadísticamente iguales y cuales no.

El número de probetas ensayadas fue siete por cada configuración de material compuesto híbrido, de las cuales se tomaron los cinco especímenes con menor dispersión para los posteriores análisis estadísticos respectivos como lo indicaron

las normas ASTM. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a las mejores configuraciones dentro de su grupo, según se indica en la Tabla 3.14. Finalmente, en el Anexo 5 se presentan los resultados en detalle y clasificados de acuerdo al tipo de ensayo.

Tabla 3.14. Códigos asignados a las 27 configuraciones diferentes de material compuesto.

No	Grupo	Código	Fibra de abacá Tipo	Vol% del refuerzo [%]	Fibra de vidrio [%]	Fibra de abacá [%]	PP [%]
1		Matriz	-	-	0	0	100
2		FV20	-	20	100	0	80
3	1	FC201002	Fibra corta 10 mm	20	75	25	80
4		FC201003	Fibra corta 10 mm	20	50	50	80
5		FC201004	Fibra corta 10 mm	20	25	75	80
6		FC201005	Fibra corta 10 mm	20	0	100	80
7	2	FC202002	Fibra corta 20 mm	20	75	25	80
8		FC202003	Fibra corta 20 mm	20	50	50	80
9		FC202004	Fibra corta 20 mm	20	25	75	80
10		FC202005	Fibra corta 20 mm	20	0	100	80
11	3	FL2002	Fibra longitudinal 250 mm	20	75	25	80
12		FL2003	Fibra longitudinal 250 mm	20	50	50	80
13		FL2004	Fibra longitudinal 250 mm	20	25	75	80
14		FL2005	Fibra longitudinal 250 mm	20	0	100	80
15		FV25	-	25	100	0	75
16	4	FC251002	Fibra corta 10 mm	25	75	25	75
17		FC251003	Fibra corta 10 mm	25	50	50	75
18		FC251004	Fibra corta 10 mm	25	25	75	75
19		FC251005	Fibra corta 10 mm	25	0	100	75
20	5	FC252002	Fibra corta 20 mm	25	75	25	75
21		FC252003	Fibra corta 20 mm	25	50	50	75
22		FC252004	Fibra corta 20 mm	25	25	75	75
23		FC252005	Fibra corta 20 mm	25	0	100	75
24	6	FL2502	Fibra continua 250 mm	25	75	25	75
25		FL2503	Fibra continua 250 mm	25	50	50	75
26		FL2504	Fibra continua 250 mm	25	25	75	75
27		FL2505	Fibra continua 250 mm	25	0	100	75

3.5.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

Los promedios de esfuerzo máximo que se registraron en los ensayos de tracción se presentan en la Tabla 3.15. Esta tabla también indica la desviación estándar y el coeficiente de variación correspondiente a las mejores configuraciones dentro de cada uno de los grupos.

Tabla 3.15. Cuadro comparativo de los resultados de esfuerzo máximo registrados en los ensayos de tracción.

Configuración	Esfuerzo máx. [MPa]	Desviación estándar [MPa]	Coeficiente de variación
FL2005	145,10	15,51	10,69 %
FL2503	139,82	15,51	11,09 %
FV25	111,52	10,59	9,50 %
FC252002	77,98	3,49	4,47 %
FV20	72,90	2,52	3,46 %
FC251002	70,21	2,43	3,46 %
FC201003	66,43	4,53	6,83 %
FC202002	62,66	2,16	3,45 %
Matriz	26,12	4,01	15,37 %

En la Tabla 3.16 se presentan las curvas esfuerzo vs. deformación de tres probetas representativas de material compuesto híbrido con igual fracción volumétrica de refuerzo de 25 vol% y una probeta de matriz polipropileno. Este gráfico permitió analizar el comportamiento mecánico a tracción del material compuesto híbrido y de su matriz.

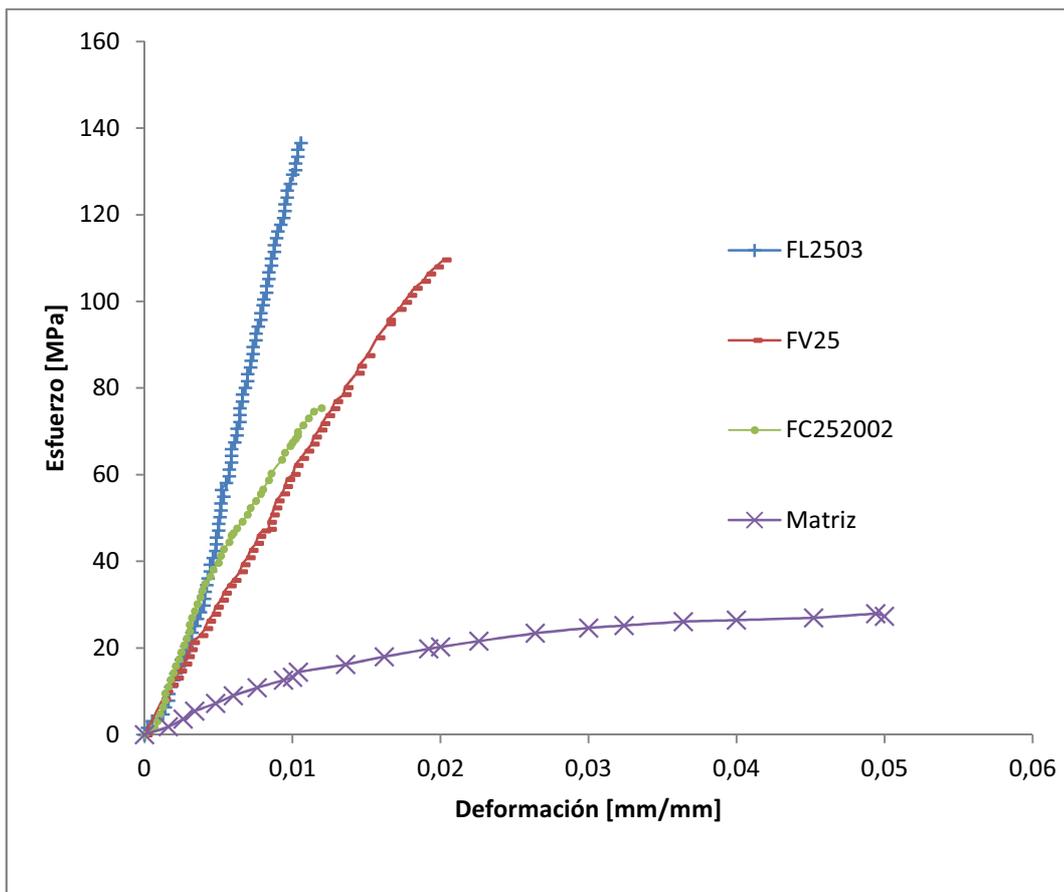


Figura 3.17. Gráfico esfuerzo vs deformación de materiales compuestos híbridos al 25% de refuerzo y matriz de polipropileno.

Este gráfico muestra que el módulo de elasticidad del compuesto reforzado con fibra continua (FL2503) es mayor que los módulos de las configuraciones FC252002 que tienen fibra corta de abacá de 20 mm, FV25 fibra de vidrio al 25 vol% de refuerzo y la matriz polipropileno. Esta última registró el módulo de elasticidad más bajo y la mayor deformación unitaria. De los cuatro materiales mostrados en la Figura 3.17 se recomienda el uso del material cuya curva esfuerzo deformación se encuentra entre las curvas con pendientes más grandes y pequeñas, es decir, se podría elegir el material compuesto híbrido de fibra corta de abacá de 20 mm FC252002 porque es menos frágil que el compuesto híbrido FL2503.

Los módulos de elasticidad promedios de las mejores configuraciones de cada grupo se presentan a continuación en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Cuadro comparativo de los resultados de módulos de elasticidad registrados en los ensayos de tracción.

Configuración	Módulo de elasticidad [MPa]	Desviación estándar [MPa]	Coefficiente de variación
FL2503	11096,30	1641,61	14,79%
FL2005	10183,70	404,96	3,98%
FC252003	8429,43	606,66	7,20%
FV25	6622,18	534,59	8,07%
FC201003	6473,00	800,88	12,37%
FC251002	5249,26	358,63	6,83%
FC202002	4830,40	404,95	8,38%
FV20	4571,16	283,75	6,21%
Matriz	1194,77	133,71	11,19%

Se observa que la configuración con mayor módulo de elasticidad es la FL2503 (11096 MPa), es decir, el compuesto híbrido de matriz polipropileno y refuerzo del 25 vol%, de los cuales el 50% es fibra continua de abacá y 50% es fibra de vidrio. La matriz polipropileno registra el menor módulo de elasticidad (1195 MPa). Cabe señalar que la fibra de vidrio en el refuerzo de los materiales híbridos tanto al 20 como al 25 vol%, reduce significativamente su módulo de elasticidad en los ensayos de tracción. En contraste, los materiales con fibra longitudinal continua de abacá como refuerzo al 20 y 25%, registraron los módulos más altos.

El resumen estadístico de elongación en los ensayos de tracción se muestra a continuación en la Tabla 3.17. Aquí se observa como las probetas de material compuesto híbrido de diferentes configuraciones de refuerzo presentan estadísticamente las mismas deformaciones. Sin embargo, en el caso de la matriz se tiene una diferencia estadística y una mayor capacidad de deformación que las demás configuraciones.

Tabla 3.17. Cuadro comparativo de los resultados de las deformaciones unitarias registradas en los ensayos de tracción.

Configuración	Deformación unitaria [mm/mm]	Desviación estándar [mm/mm]	Coefficiente de variación
Matriz	0,0425	0,0253	59,48%
FC251002	0,0189	0,0017	8,76%
FV25	0,0178	0,0017	9,61%
FC201003	0,0166	0,0010	5,99%

Continuación de la Tabla 3.17.

Configuración	Deformación unitaria [mm/mm]	Desviación estándar [mm/mm]	Coefficiente de variación
FV20	0,0165	0,0014	8,35%
FC252002	0,0158	0,0010	6,08%
FC202002	0,0153	0,0009	5,80%
FL2504	0,0130	0,0021	16,32%
FL2005	0,0128	0,0013	10,54%

Los diferentes tipos de probetas ensayadas y las fracturas que presentaron en el ensayo de tracción así como también su micrografía obtenida con el microscopio de barrido electrónico se presentan a continuación:

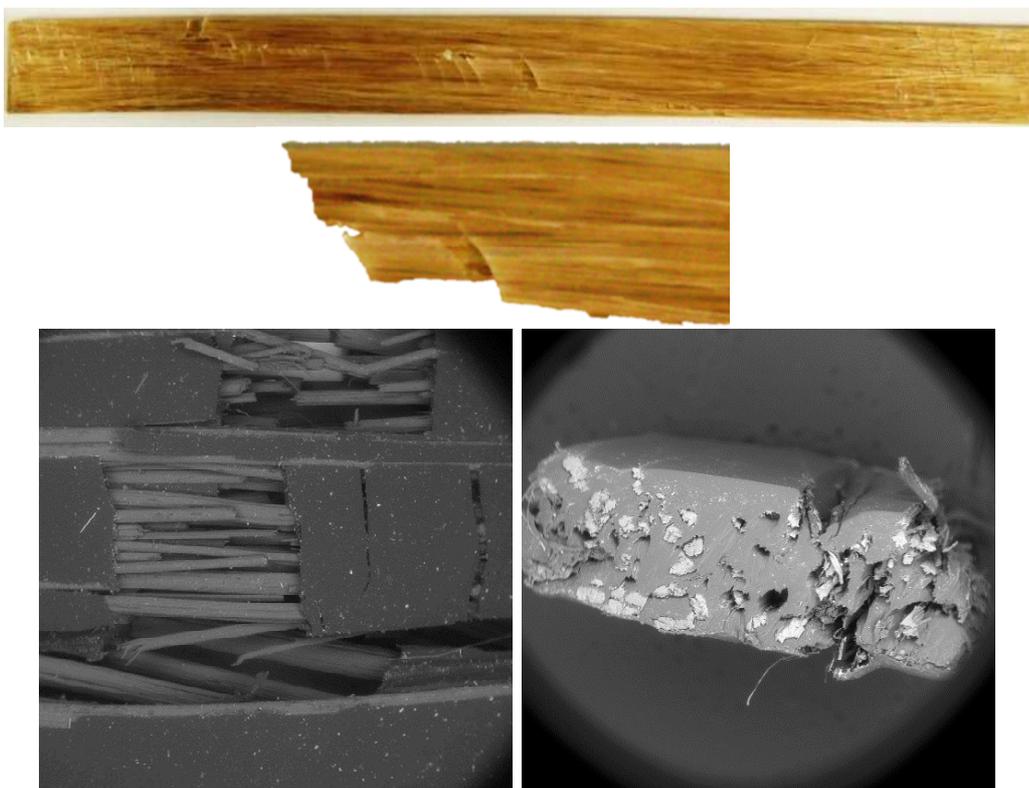


Figura 3.18. Fracturas presentadas en los ensayos de tracción para la fibra continua unidireccional abacá 20 vol%

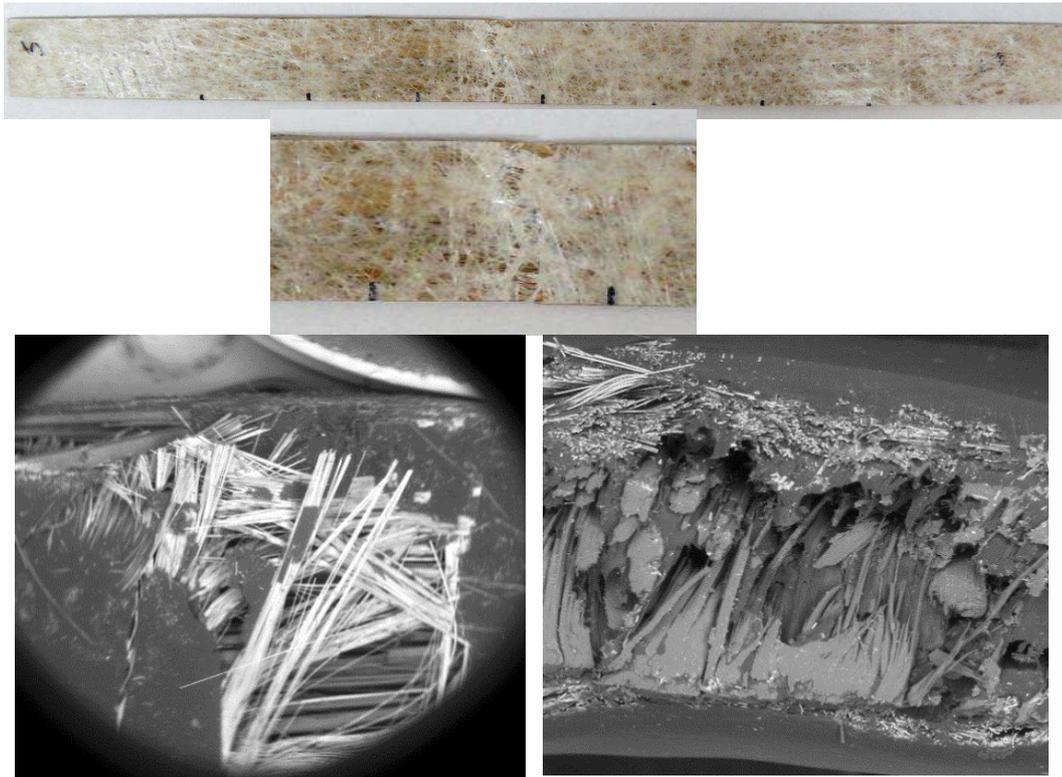


Figura 3.19. Fracturas presentadas en los ensayos de tracción para la fibra continua unidireccional 25 vol% de refuerzo (50% abacá / 50% fibra de vidrio)

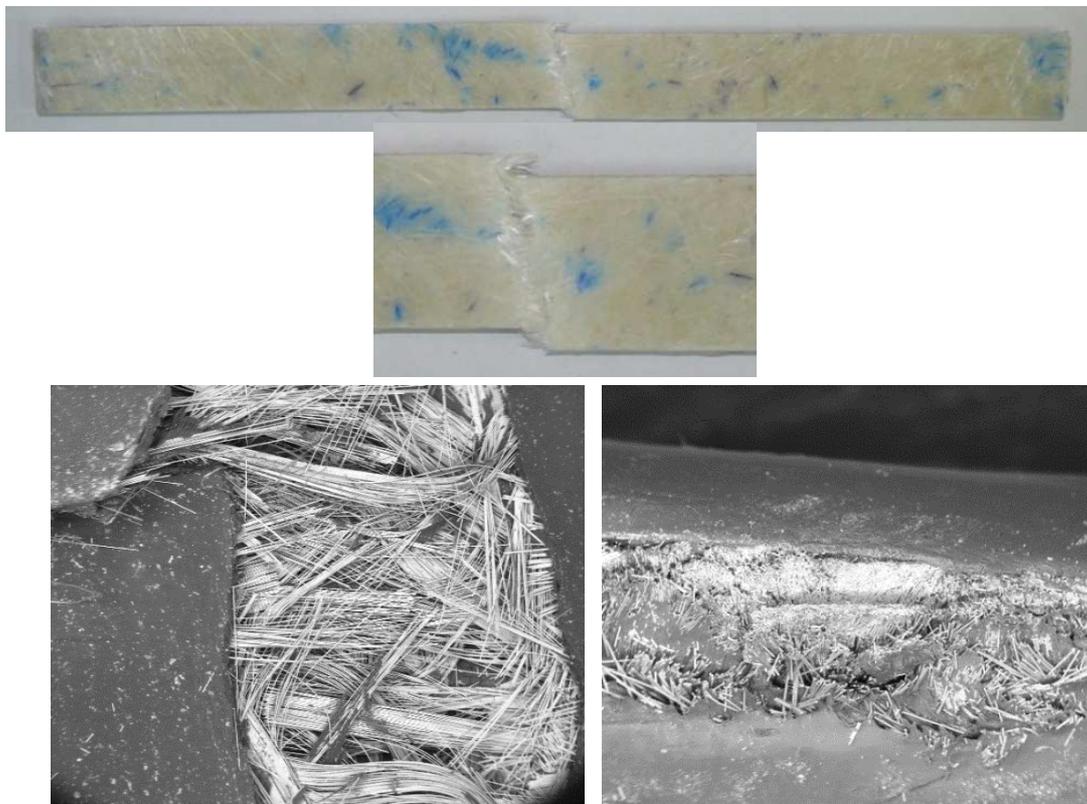


Figura 3.20. Fracturas presentadas en los ensayos de tracción para la fibra de vidrio al 25 vol% como único refuerzo.

En la Figura 3.18 se presenta la fractura del material compuesto FL2005 (refuerzo al 20 vol% de abacá), la misma que empezó a fallar en la matriz a nivel superficial y la fractura se prolonga en la dirección del refuerzo a lo largo de las fibras de abacá. La micrografía muestra una correcta distribución de la matriz entre las fibras.

En la Figura 3.19 se presenta la fractura del compuesto híbrido FL2503 (refuerzo híbrido, 50V/50A, al 25 vol%), su falla se dio en el centro de la probeta y se puede apreciar que la fractura empezó en la matriz. Sin embargo, se observa que el refuerzo de fibras de vidrio y de abacá permanece entrelazado y no presentan fractura o rotura alguna. En la micrografía se tiene que las fibras de abacá de la parte externa se han fracturado en la zona de falla con una adecuada distribución de la matriz entre las fibras.

En la Figura 3.20 se presenta la fractura del compuesto FV25 (refuerzo de fibra de vidrio al 25 vol%), al igual que en los anteriores compuestos su fractura empezó en la matriz. Además, se observa que el refuerzo de fibra de vidrio se rompió en su mayoría. La micrografía de esta configuración revela una buena adherencia de las fibras de vidrio con la matriz.

En la Tabla 3.18 se presenta la comparación de las propiedades mecánicas a tracción de las diferentes configuraciones de material compuesto híbrido polipropileno-abacá-fibra de vidrio con respecto a la matriz de polipropileno.

Tabla 3.18. Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas a tracción de la matriz de PP y de varias configuraciones de material compuesto híbrido.

Tipo del material compuesto híbrido	Fracción volumétrica del refuerzo	Fracción volumétrica de fibras [%]		Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Deformación máxima promedio
	[%]	Abacá	Fibra de vidrio	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]
Fibra de abacá continua orientada longitudinalmente	20	100	0	145,10	10183,7	0,0128

Continuación de Tabla 3.18.

Tipo del material compuesto híbrido	Fración volumétrica del refuerzo	Fración volumétrica de fibras [%]		Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Deformación máxima promedio
	[%]	Abacá	Fibra de vidrio	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]
Fibra de abacá continua orientada longitudinalmente	25	50	50	139,82	11096,30	0,0114
Fibra de vidrio en forma de mat	25	0	100	111,52	6622,18	0,0178
Fibra de abacá corta de 20 mm	25	25	75	77,98	5224,35	0,0158
Fibra de vidrio en forma de mat	20	0	100	72,90	4571,16	0,0165
Fibra de abacá corta de 10 mm	25	25	75	70,21	4922,54	0,0189
Fibra de abacá corta de 10 mm	20	50	50	66,43	6473,00	0,0166
Fibra de abacá corta de 20 mm	20	25	75	62,66	4830,40	0,0153
Matriz PP	0	0	0	26,12	1194,77	0,0425

3.5.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Los esfuerzos máximos promedios obtenidos en los ensayos de flexión se muestran en la Tabla 3.19. Estos resultados pertenecen a las mejores configuraciones fibra de vidrio/fibra de abacá de cada grupo ensayado y las curvas típicas esfuerzo vs deformación tanto de la matriz como de los materiales compuestos híbridos más representativos se presentan en la Figura 3.21.

Tabla 3.19. Cuadro comparativo de los esfuerzos máximos registrados en los ensayos de flexión.

Configuración	Esfuerzo máx. flexión [MPa]	Desviación estándar	Coefficiente de variación
FL2505	83,38	9,31	11,16%
FL2005	62,77	7,58	12,07%
FV25	62,62	4,16	6,65%
FC251004	60,78	2,61	4,29%
FV20	58,15	4,91	8,45%
FC202002	53,99	7,42	13,73%
FC252002	52,92	4,66	8,80%
FC201003	46,14	4,77	10,35%
Matriz PP	24,31	2,40	9,88%

Los resultados de módulo de elasticidad promedio que se obtuvieron a partir de los ensayos de flexión son los mostrados en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Cuadro comparativo de los resultados de las deformaciones unitarias registradas en los ensayos de flexión.

Configuración	Módulo de elasticidad flexión [MPa]	Desviación estándar	Coefficiente de variación
FL2505	7118,00	959,70	13,48%
FC252002	5288,40	465,90	8,81%
FC251004	4763,48	339,15	7,12%
FV25	4335,36	528,51	12,19%
FL2005	4050,30	675,33	16,67%
FC201004	3655,42	438,53	12,00%
FC202002	3123,98	204,31	6,54%
FV20	2747,20	212,34	7,73%
Matriz PP	1267,28	98,53	7,78%

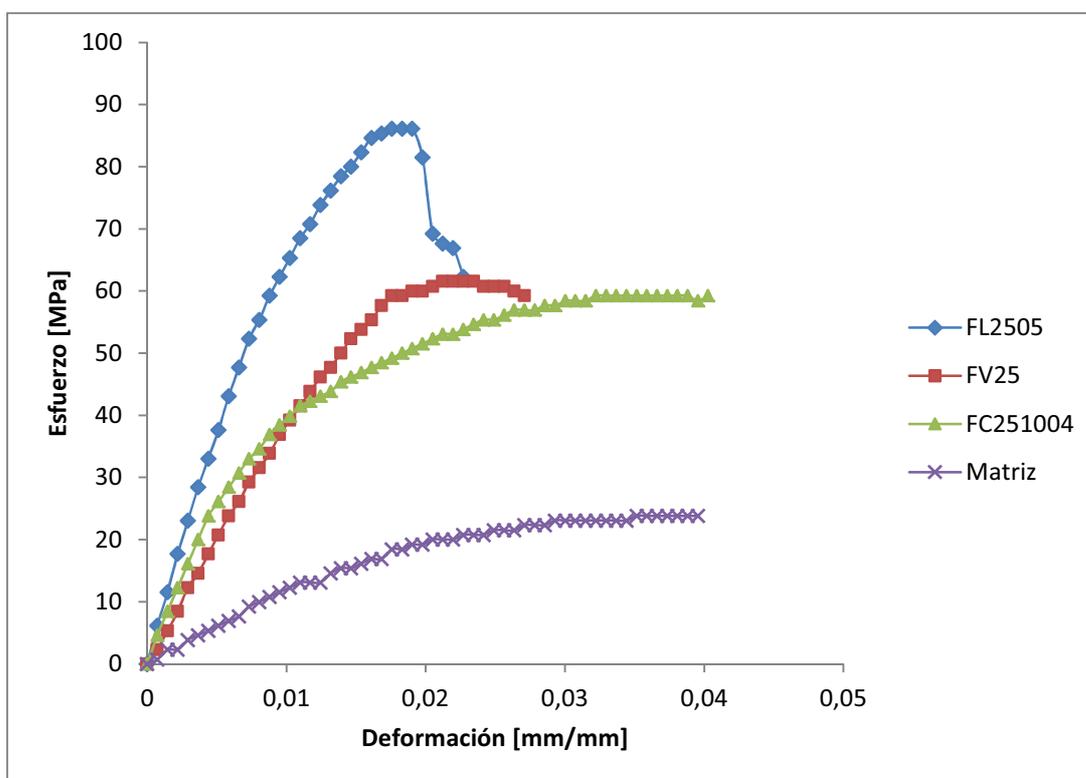


Figura 3.21. Gráfico esfuerzo vs deformación a flexión de materiales compuestos híbridos fibra de abacá-fibra de vidrio y matriz de polipropileno.

Al observar la Figura 3.21 se evidencia que las configuraciones ensayadas presentaron el mismo comportamiento al someterse a esfuerzos de flexión, este comportamiento fue lineal y frágil para compuestos híbridos, mientras que la matriz polipropileno tuvo un comportamiento muy frágil a la flexión, es decir, la matriz falló casi al instante de la aplicación de la presión

Los resultados de deformación que presentaron las probetas en los ensayos de flexión, se presentan en el resumen estadístico a continuación en la Tabla 3.20. Cabe señalar que estas deformaciones son iguales estadísticamente de acuerdo al análisis ANOVA de comparación de varias muestras realizado por el software de análisis estadístico Statgraphics. Sin embargo, la configuración FV25 (compuesto con fibra de vidrio al 25 vol% de refuerzo) es estadísticamente diferente y presentó una menor deformación que las otras configuraciones.

Tabla 3.21. Resumen estadístico de los resultados de deformaciones unitarias en los ensayos de flexión.

Configuración	Deformación [mm/mm]	Desviación estándar	Coefficiente de variación
FL2005	0,0409	0,0048	11,73%
FC202002	0,0403	0,0009	2,13%
FC201003	0,0399	0,0008	2,08%
Matriz PP	0,0394	0,0006	1,61%
FC251004	0,0387	0,0012	3,11%
FL2504	0,0385	0,0020	5,11%
FV20	0,0384	0,0011	2,94%
FC252002	0,0372	0,0042	11,23%
FV25	0,0318	0,0045	14,00%

A continuación se muestra en la Figura 3.22 las fracturas de los materiales compuestos híbridos y la matriz polipropileno en los ensayos de flexión.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.22. (a) fibra longitudinal unidireccional de abacá al 25 vol% de refuerzo, (b) fibra corta de abacá al 20 vol% de refuerzo (25% fibra de vidrio/75% abacá), (c) fibra longitudinal unidireccional al 25 vol% de refuerzo (25% abacá/75% fibra de vidrio).

El material compuesto de la figura (a) tiene un refuerzo de fibra continua unidireccional y luego de someterla a esfuerzos de flexión falló en la zona central de la misma sin romperse. En la figura (b) se tiene un material compuesto híbrido de fibra corta de abacá de 10 mm que no falló al ser sometido al ensayo de flexión. Finalmente, se tiene la probeta de la figura (c) con refuerzo híbrido y fibra continua unidireccional al 25 vol% en donde no hubo fractura y presentó un abultamiento debido a la alta concentración de fibra de vidrio.

En la Tabla 3.22 se presenta la comparación de las propiedades mecánicas a tracción de las diferentes configuraciones de material compuesto híbrido polipropileno-abacá-fibra de vidrio con respecto a la matriz polipropileno.

Tabla 3.22. Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas a tracción de los materiales compuestos híbridos y de la matriz de polipropileno.

Tipo del material compuesto híbrido	Fración volumétrica del refuerzo	Fración volumétrica de fibras [%]		Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Deformación máxima promedio
	[%]	Abacá	Fibra de vidrio	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]
Fibra de abacá continua orientada longitudinalmente	25	100	0	83,38	7118,00	0,0287
Fibra de abacá continua orientada longitudinalmente	20	100	0	62,77	3827,00	0,0403
Fibra de vidrio en forma de mat	25	0	100	62,62	4335,36	0,0318
Fibra de abacá corta de 10 mm	25	75	25	60,78	4736,48	0,0378
Fibra de vidrio en forma de mat	20	0	100	58,15	2747,20	0,0384
Fibra de abacá corta de 20 mm	20	25	75	53,99	3123,98	0,0403
Fibra de abacá corta de 20 mm	25	25	75	52,92	5288,40	0,0372
Fibra de abacá corta de 10 mm	20	50	50	46,14	2726,46	0,0399
Matriz PP	0	0	0	24,31	1267,28	0,0394

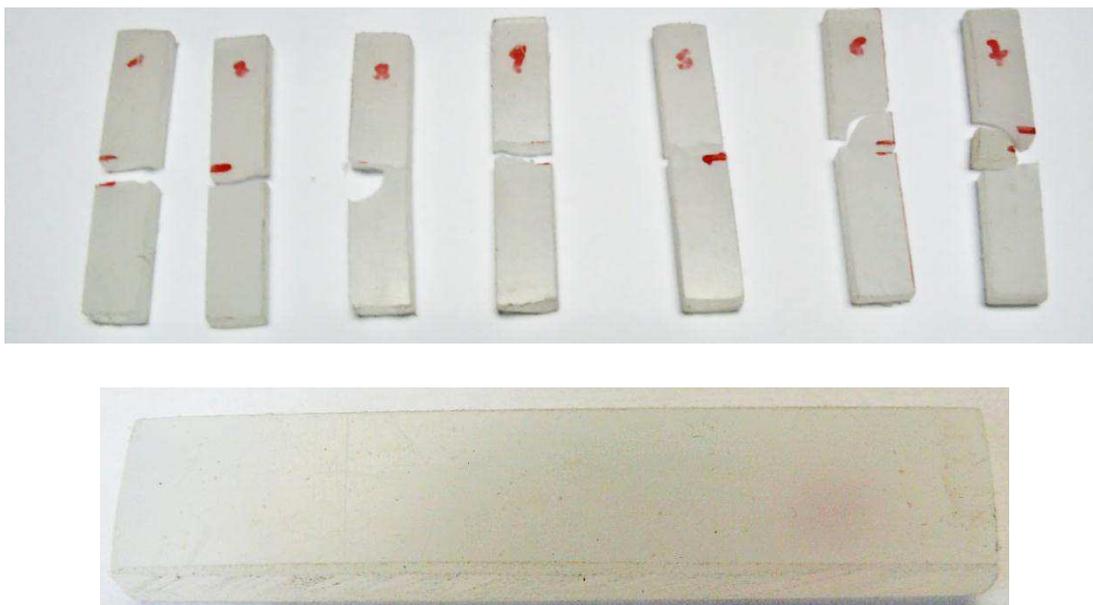
3.5.3. ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO

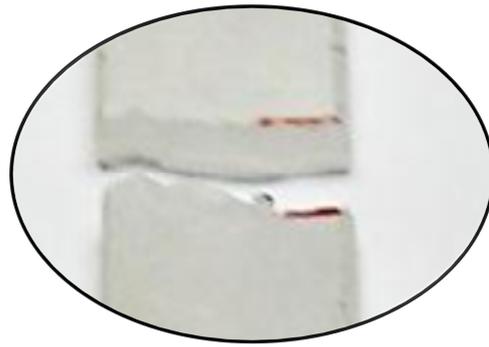
Las probetas para ensayos de impacto fueron elaboradas sin la muesca establecida en la norma ASTM D 256-10, debido a que el maquinado de las mismas desprendía las fibras en el lugar de la muesca, lo cual generaría concentradores de esfuerzos irregulares con posibles errores en los resultados. En la Tabla 3.23 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3.23. Cuadro comparativo de los resultados de resistencia al impacto.

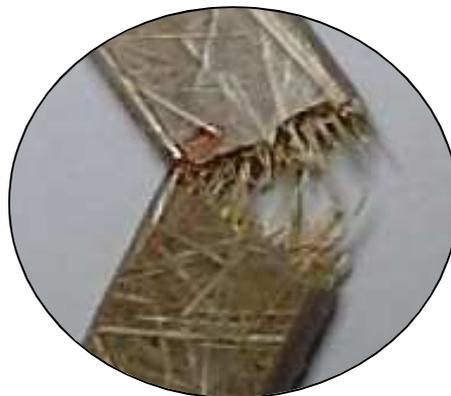
Configuración	Resistencia al impacto [J]	Desviación estándar	Coefficiente de variación
FV25	12,37	0,2044	1,65%
FL2502	11,13	0,2348	2,11%
FL2004	10,99	0,1961	1,78%
FC252002	9,99	0,1374	1,38%
FC201002	8,35	0,1168	1,40%
FV20	8,12	0,3482	4,29%
FC251002	7,92	0,1815	2,29%
FC202002	7,51	0,1966	2,62%
Matriz	3,64	0,1746	4,80%

Los tipos de fractura que tuvieron las probetas de impacto se indican en la Figura 3.23.

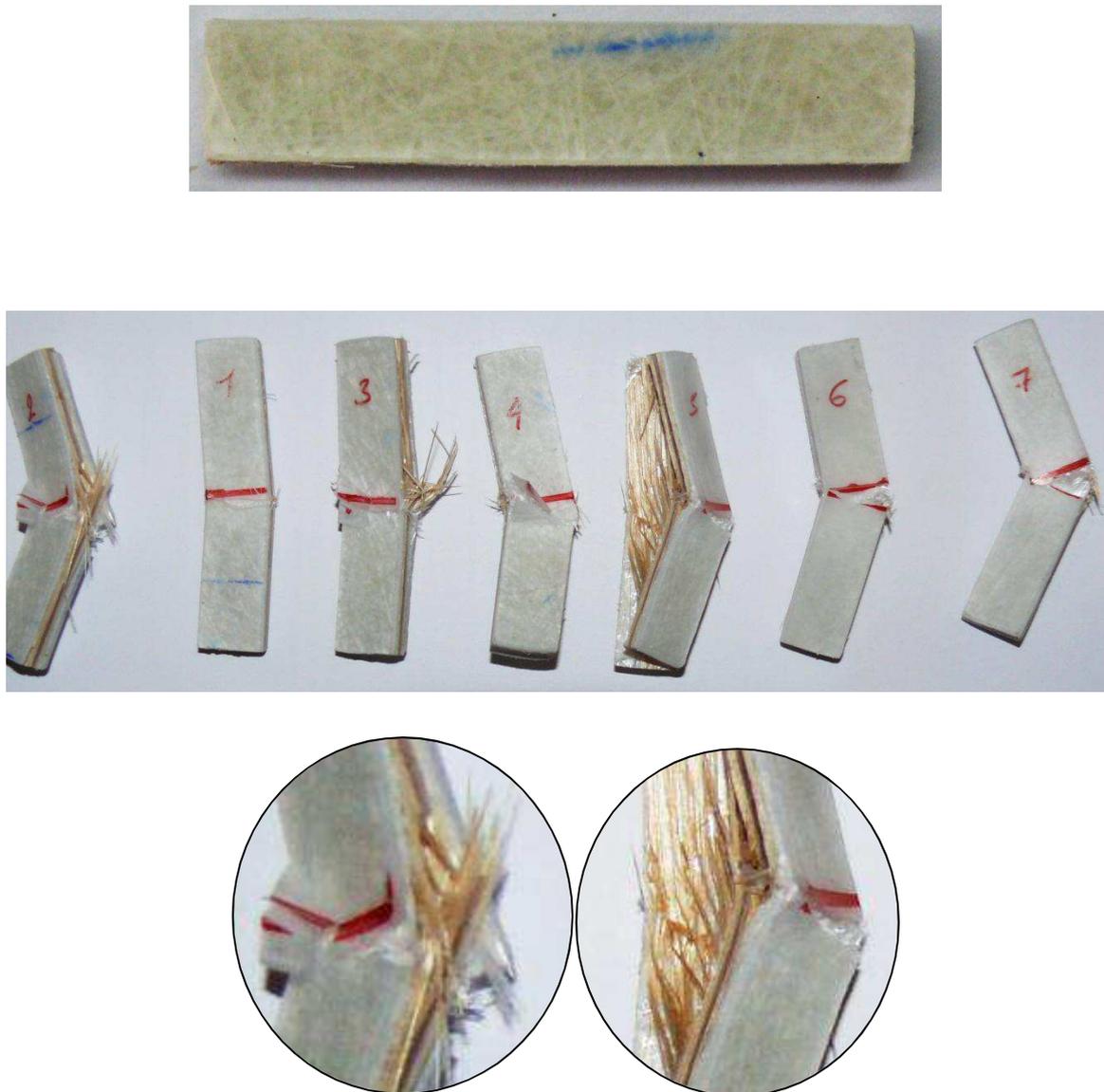




(a) Fractura completa de la matriz de polipropileno luego del ensayo de impacto.



(b) Fractura de bisagra en probetas de material compuesto.



(c) Fractura tipo bisagra en probetas de material compuesto híbrido.

Figura 3.23. Tipos de falla en probetas de impacto de materiales compuestos híbridos: (a) matriz de polipropileno, (b) fibra corta de abacá al 20 vol%, (c) fibra longitudinal unidireccional de abacá al 20 vol% (50% abacá / 50% fibra de vidrio).

En la figura anterior se puede apreciar dos tipos de fracturas: la matriz PP presentó una fractura completa, es decir se separó en dos piezas; el segundo tipo de falla fue del tipo fractura de bisagra, en la cual la fractura es incompleta de tal modo que la parte de la probeta que está sometida al impacto queda separada de la otra que se encuentra sostenida por la entenalla, dejando un ángulo de $<90^\circ$ entre sus partes. Además, para el caso del compuesto híbrido con fibra continua

se aprecia una separación entre las capas en la interfaz fibra de abacá/ fibra de vidrio (probeta 5).

3.6. DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS

Para determinar la densidad teórica de los compuestos para las distintas fracciones volumétricas se requiere conocer las densidades de la matriz PP y de las fibras de abacá y vidrio. Estas densidades fueron tomadas de fichas técnicas proporcionadas por los proveedores y para el caso de la fibra de abacá se la obtuvo de proyectos anteriores realizados en la Escuela Politécnica Nacional (Pontón, 2009)¹³

Como se puede apreciar en la Tabla 3.24 los porcentajes de desviación estándar son muy bajos al compararlos con sus respectivos promedios. Esto establece que los valores de densidades teóricas y reales no son tan diferentes. Las densidades reales de las mejores configuraciones de los compuestos híbridos elegidos fueron comparadas con su matriz y con los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá. En conclusión, el material con refuerzo híbrido al 20 vol% (25V/75A) tiene una densidad real muy cercana a la densidad de la matriz. El valor de la densidad real del compuesto fue uno de los criterios que se tomaron para la selección del prototipo.

Tabla 3.24. Densidades teóricas y reales de los materiales elaborados.

Configuración	Densidad teórica (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Promedio (g/cm ³)	Desviación	CV (%)
Matriz	0,91	0,89	0,90	0,01	1,58
FV20	1,23	1,13	1,18	0,07	6,22
FC201002	1,17	1,17	1,17	0,00	0,06
FC201003	1,19	1,10	1,15	0,06	5,56
FC201004	1,05	0,99	1,02	0,04	3,89
FC201005	0,98	0,92	0,95	0,04	4,52
FC202002	1,17	1,15	1,16	0,01	1,03
FC202003	1,11	1,09	1,10	0,01	1,22
FC202004	1,05	0,99	1,02	0,04	4,10
FC202005	0,98	0,92	0,95	0,05	4,83
FL2002	1,17	1,09	1,13	0,06	5,07

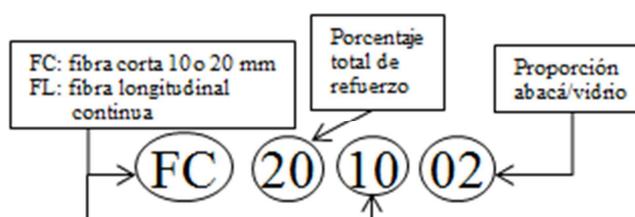
¹³ Pontón, P.; Estudio del efecto de encolado de fibra de abacá en el mejoramiento de su capacidad de tisaje; EPN; Quito; 2009.

Continuación de Tabla 3.24.

Configuración	Densidad teórica (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Promedio (g/cm ³)	Desviación	CV (%)
FL2003	1,11	1,06	1,08	0,04	3,46
FL2004	1,05	0,99	1,02	0,04	4,25
FL2005	0,98	0,90	0,94	0,06	6,31
FV25	1,32	1,25	1,28	0,05	3,81
FC251002	1,23	1,16	1,20	0,05	4,08
FC251003	1,16	1,04	1,10	0,09	7,78
FC251004	1,08	1,01	1,04	0,05	5,20
FC251005	1,00	0,81	0,91	0,13	14,76
FC252002	1,23	1,17	1,20	0,04	3,48
FC252003	1,16	1,09	1,13	0,05	4,40
FC252004	1,08	0,99	1,04	0,07	6,29
FC252005	1,00	0,94	0,97	0,05	4,66
FL2502	1,24	1,17	1,20	0,05	4,30
FL2503	1,16	1,09	1,13	0,05	4,14
FL2504	1,08	0,96	1,02	0,09	8,60
FL2505	1,00	0,83	0,92	0,13	13,67

3.7. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO ABACÁ/VIDRIO/POLIPROPILENO FRENTE A OTROS MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS

La denominación de los materiales ensayados consiste de dos letras que indican el tipo de la fibra de abacá y de dos a seis números que indican la proporción abacá/vidrio y el porcentaje total de refuerzo como se ilustra en el siguiente ejemplo:



La proporción abacá/vidrio se codifica de la siguiente forma:

02 = 25/75%

03 = 50/50%

04 = 75/25%

05 = 100/0%

El módulo de trabajo se calculó para aquellas configuraciones que no presentan zona lineal en el diagrama esfuerzo vs. deformación unitaria y es la pendiente de la curva para la zona comprendida entre el primer y tercer cuartil de los esfuerzos y sus respectivas deformaciones unitarias registrados para esa configuración.

Las propiedades mecánicas de tracción de las 27 configuraciones son comparadas mediante un gráfico resistencia específica vs. módulo específico en la Figura 3.24. Las configuraciones FL2505, FL2005, FL2504 y FL2503 presentan las mejores propiedades mecánicas a tracción cuando se tiene en cuenta la densidad del material. De manera similar, en la Figura 3.25 se tiene el gráfico resistencia específica vs. módulo específico en flexión. En esta propiedad mecánica sobresalen también las configuraciones que se destacaron a tracción. Cabe recalcar que el compuesto FL2505 posee una marcada diferencia de propiedades a flexión superiores que las otras configuraciones.

En tracción y flexión la matriz tiene las propiedades mecánicas más bajas que se registraron. Por otro lado, se mantiene la tendencia de que materiales compuestos híbridos de matriz polipropileno reforzados con vidrio y fibras cortas de abacá de 20 mm poseen mayores propiedades mecánicas que aquellos reforzados con fibras de 10 mm. Además, los materiales con refuerzos de vidrio y fibras de abacá en forma continua longitudinal son los que resisten las mayores cargas de tracción y flexión en comparación con las demás configuraciones estudiadas en el presente proyecto.

El resumen de propiedades mecánicas que presentaron las diferentes configuraciones de material compuesto híbrido, se comparan con la matriz polipropileno en la Tabla 3.25 que se presenta a continuación.

Tabla 3.25. Cuadro general de resultados de las propiedades mecánicas de compuestos híbridos de polipropileno, fibra de abacá y fibra de vidrio.

No.	Configuración	Ensayo de tracción				Ensayo de flexión*				Resistencia al Impacto promedio	Densidad real
		Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Módulo de trabajo promedio	Elongaciones máximas	Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Módulo de trabajo promedio			
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J]	[g/cm ³]
1	Matriz de PP	26,12	1194,77	798,94	0,0425	24,31	1267,28	562,94	3,64	0,89	
2	FV20	72,90	4571,16	-	0,0165	58,15	2747,20	1885,38	12,37	1,13	
3	FC201002	64,06	4288,26	-	0,0155	46,14	2600,60	910,63	8,35	1,17	
4	FC201003	66,50	6473,00	3323,90	0,0166	46,14	2726,46	902,66	6,39	1,10	
5	FC201004	38,42	5924,80	3364,90	0,0117	50,28	3655,42	803,32	5,41	0,99	
6	FC201005	25,31	5015,17	1940,57	0,0133	34,17	2424,50	647,76	2,61	0,92	
7	FC202002	62,66	4830,40	-	0,0153	53,99	3123,98	2276,20	7,51	1,15	
8	FC202003	54,83	4704,40	-	0,0126	45,97	3138,52	755,80	7,05	1,09	
9	FC202004	49,35	4010,82	-	0,0135	55,08	3416,60	1142,71	4,63	0,99	
10	FC202005	35,27	2829,76	-	0,0145	39,35	2501,98	697,89	2,00	0,92	
11	FL2002	108,57	9949,46	-	0,0121	68,31	3614,88	2625,88	8,74	1,09	
12	FL2003	112,40	8790,40	-	0,0136	66,16	3590,68	2115,08	10,13	1,06	

Continuación de Tabla 3.25.

No.	Configuración	Ensayo de tracción				Ensayo de flexión*				Resistencia al Impacto promedio	Densidad
		Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Módulo de trabajo promedio	Elongaciones máximas	Resistencia máxima promedio	Módulo de elasticidad promedio	Módulo de trabajo promedio			
									[MPa]		
13	FL2004	112,01	8299,40	-	0,0137	54,77	2935,20	1560,70	10,99	0,99	
14	FL2005	145,10	10183,70	-	0,0128	62,77	3827,00	1167,48	6,75	0,90	
15	FV25	111,52	6622,18	-	0,0178	62,62	4335,36	2814,02	12,37	1,25	
16	FC251002	70,21	5249,26	3544,12	0,0190	51,23	3918,18	1165,81	7,92	1,16	
17	FC251003	49,40	3902,96	2730,20	0,0184	50,92	4660,08	3127,80	6,91	1,04	
18	FC251004	43,54	4922,54	3124,18	0,0152	60,78	4763,48	1007,55	5,61	1,01	
19	FC251005	26,19	2654,13	2179,57	0,0133	35,57	2485,65	746,46	2,98	0,81	
20	FC252002	77,98	5224,35	-	0,0158	52,92	5288,40	3626,64	9,99	1,17	
21	FC252003	70,56	8429,43	4902,77	0,0150	37,23	2508,32	759,05	5,98	1,09	
22	FC252004	50,28	6416,65	4044,40	0,0118	56,77	4272,92	1142,48	5,35	0,99	
23	FC252005	34,58	3854,46	2660,80	0,0135	45,55	3165,6	1062,63	3,54	0,94	
24	FL2502	106,62	9085,00	-	0,0121	70,19	4712,20	2742,22	11,13	1,17	
25	FL2503	139,82	11096,30	15700,00	0,0114	74,78	4415,18	3159,94	9,45	1,09	
26	FL2504	141,20	11101,00	-	0,0130	66,15	4005,06	2070,24	8,67	0,96	
27	FL2505	136,30	10635,40	-	0,0153	83,38	7118,00	4364,04	4,98	0,83	

* Las probetas ensayadas a flexión no se rompieron.

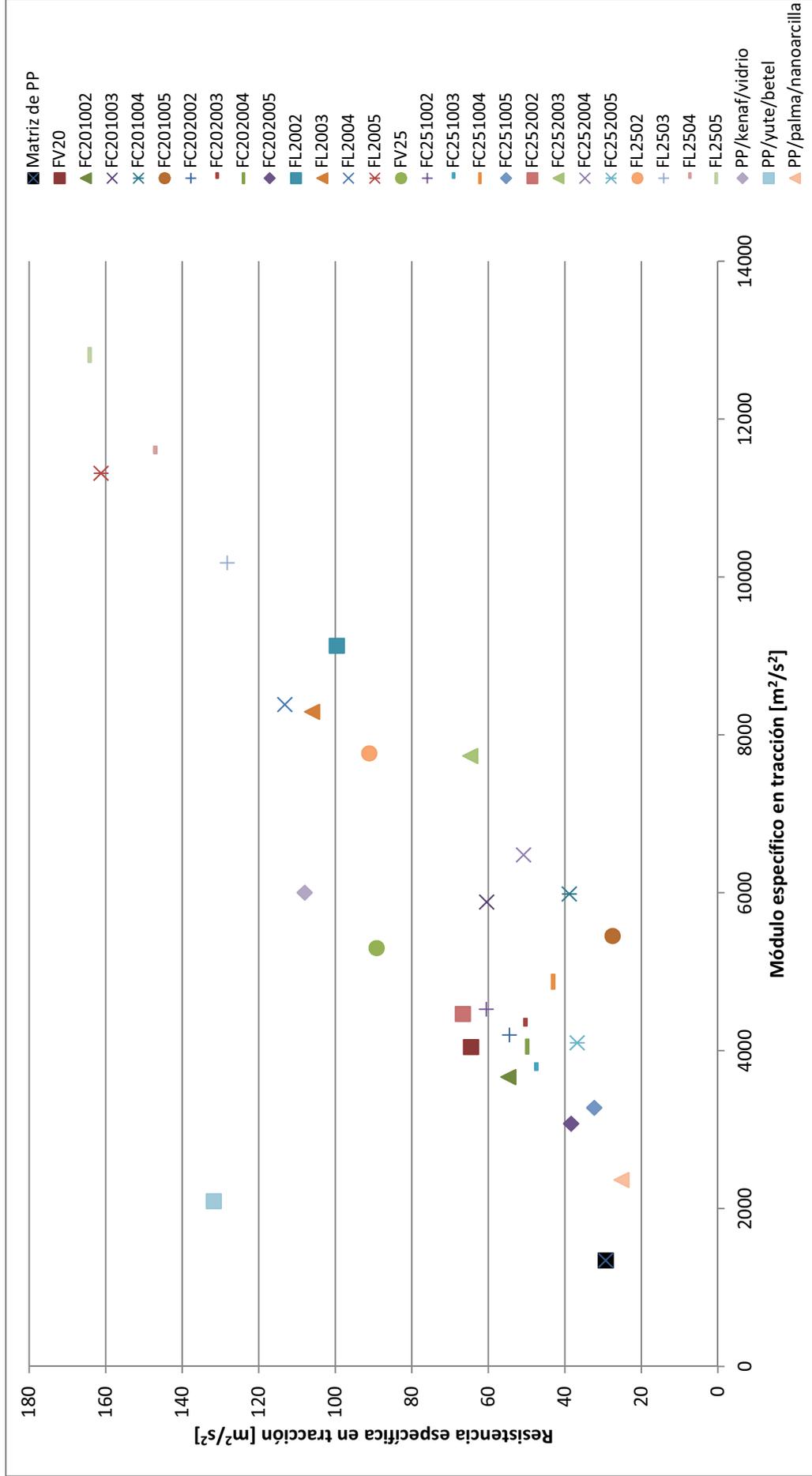


Figura 3.24. Resistencia específica vs. módulo específico en tracción de las 27 configuraciones en estudio y materiales de referencia.

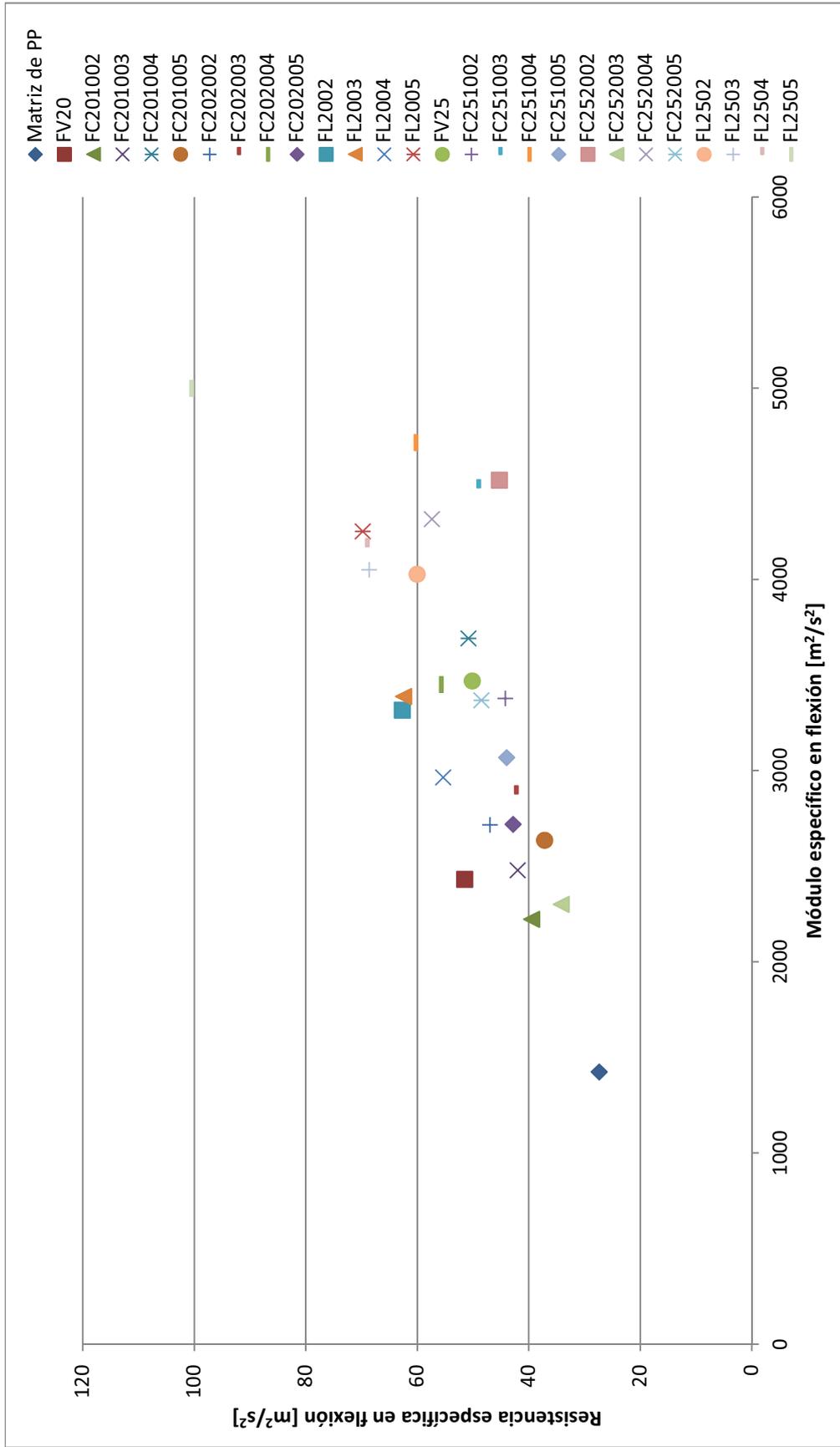


Figura 3.25. Resistencia específica vs. módulo específico en flexión de las 27 configuraciones en estudio.

Se recopiló información de varios estudios y proyectos de titulación realizados en la EPN referentes a materiales compuestos de matriz polimérica. A continuación, se muestran tabuladas las propiedades mecánicas de algunos de estos materiales compuestos, así como también gráficos radiales con las propiedades mecánicas del material en estudio en comparación con los diferentes materiales detallados en las tablas.

3.7.1. Compuestos de matriz PLA reforzados con fibra de abacá

Como se puede observar en la Tabla 3.26 y en la Figura 3.26, las propiedades de los materiales compuestos de matriz PLA reforzados con fibra corta de abacá al 20 vol%, son inferiores que las propiedades mecánicas del material compuesto híbrido de matriz PP reforzado con fibra corta de abacá de 10 mm al 25 vol%. Además, las propiedades mecánicas de ambos materiales son similares para el caso en el que el refuerzo es fibra continua orientada longitudinalmente. Por otra parte, las propiedades a tracción son ligeramente mayores en el material compuesto híbrido con 139,82 MPa y 110,96 MPa de resistencia máxima y módulo de elasticidad respectivamente, mientras que en el compuesto de PLA sus propiedades son 132,00 MPa y 92,23 MPa respectivamente. Por otro lado, se observa que a flexión las propiedades mecánicas son superiores para el compuesto de PLA reforzado con fibra continua que para el material compuesto híbrido en estudio. Finalmente, al comparar las propiedades mecánicas de ambas matrices, se tiene que el PLA supera al PP tanto a tracción como a flexión.

Tabla 3.26. Propiedades mecánicas de compuestos de PLA y fibras naturales de abacá.¹⁴

Tipo del material	Vol% de refuerzo	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad a la tracción [MPa]	Resistencia máxima a la flexión [MPa]	Módulo de elasticidad a la flexión [MPa]
PLA	0	50,00	4030,00	69,00	2755,00
Compuesto de fibra corta de 10 mm	20	35,00	3366,00	43,00	2359,00
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	20	132,00	9223,00	104,40	5570,00

¹⁴ PONCE, D; Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Diciembre-2011.

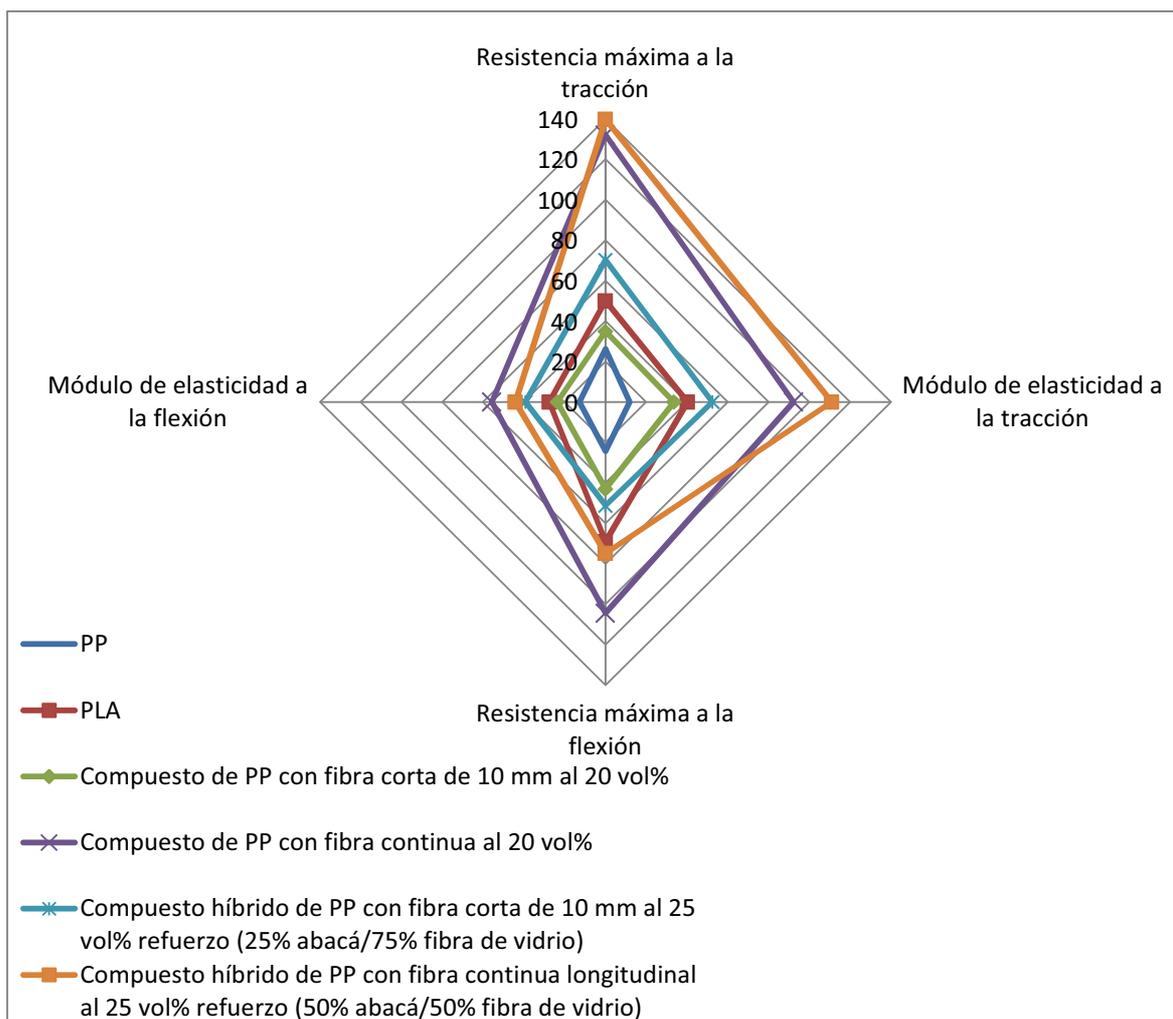


Figura 3.26. Gráfico radial de materiales compuestos PLA/abacá frente a los compuestos híbridos en estudio.

3.7.2. Compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya

Al comparar los resultados de los ensayos mecánicos de los materiales compuestos de resina poliéster reforzados con cabuya de la Tabla 3.27, con las propiedades mecánicas alcanzadas por el material híbrido en estudio y la Figura 3.27, se tiene que el compuesto híbrido de fibra corta de 20 mm al 25 vol% refuerzo (25% abacá/75% fibra de vidrio) es más resistente a la tracción en un 22% que el compuesto de cabuya. Sin embargo, este último material es 26% superior en resistencia máxima a la flexión que el compuesto híbrido de fibra corta de 20 mm. Los módulos de elasticidad son similares para ambos materiales. Además, se observa que el material compuesto híbrido con fibra continua longitudinal al 25 vol% (50% abacá/50% fibra de vidrio) tiene un comportamiento

bastante superior en el ensayo de tracción que el compuesto resina poliéster/cabuya, de hecho la resistencia a la tracción del compuesto híbrido con fibra continua longitudinal de abacá es 2,3 veces superior que el compuesto reforzado con cabuya. Se tiene una diferencia similar en el módulo de elasticidad a tracción. En cuanto a esfuerzos de flexión ambos materiales se comportan de manera similar.

Tabla 3.27. Propiedades mecánicas de la resina poliéster y compuesto reforzado con fibra de cabuya.¹⁵

Tipo de material	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad a la tracción [MPa]	Resistencia máxima a la flexión [MPa]	Módulo de elasticidad a la flexión [MPa]	Energía absorbida al impacto [J]*
Resina poliéster	28,67	1492,42	56,62	1867,82	0,70
A.SE. 16h.34% cabuya**	60,63	6508,18	76,29	4430,10	0,15

* Valores de energía absorbida al impacto resultados de ensayos de impacto por caída de dardo en paneles.

** Compuesto sin estireno con 16 horas de secado con 34 vol% de refuerzo de cabuya.

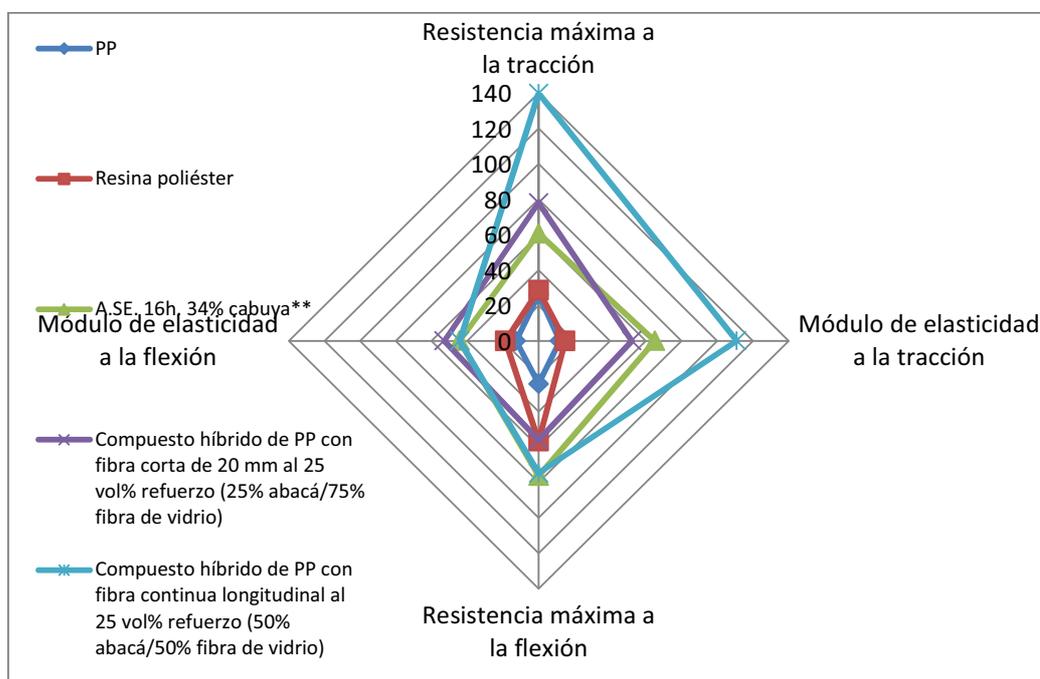


Figura 3.27. Gráfico radial del material compuesto resina poliéster/cabuya frente a compuestos híbridos en estudio.

¹⁵ TAMAYO, A; Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras de cabuya; Laboratorio de Nuevos Materiales; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Noviembre; 2011.

3.7.3. Compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión

De acuerdo a la Tabla 3.28 y a la Figura 3.28 se observa que el material compuesto híbrido reforzado con abacá y fibra de vidrio presenta propiedades superiores a tracción y flexión al compararlo con el material compuesto reforzado solo con abacá. Por ejemplo, la resistencia máxima a tracción del compuesto híbrido de fibra corta de abacá de 20 mm y fibra de vidrio al 25 vol% es 2 veces mayor que la del material compuesto de fibra corta de abacá de 30 mm al 35 vol% refuerzo, mientras que la resistencia máxima a flexión de este compuesto híbrido es mayor en un 7% que la del otro material. Adicionalmente, los módulos de elasticidad a tracción y flexión son superiores en el compuesto híbrido en 4 y 3 veces respectivamente. El comportamiento mecánico de los materiales que tienen fibra continua longitudinal como refuerzo es similar. Es decir, el material compuesto híbrido en estudio tiene mejores propiedades a tracción que el compuesto al 35 vol% de refuerzo de abacá.

Tabla 3.28. Propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá.¹⁶

Tipo de material	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad a la tracción [MPa]	Resistencia máxima a la flexión [MPa]	Módulo de elasticidad a la flexión [MPa]
Polipropileno	31,62	548,65	37,50	1249,60
Compuesto de fibra corta de abacá de 30 mm al 35 vol%	37,30	1277,80	52,33	1952,00
Compuesto de fibra corta de abacá de 20 mm al 35 vol%	38,45	1100,00	51,70	1989,00
Compuesto de fibra de abacá continua orientada longitudinalmente al 35 vol%	87,44	2400,00	124,36	5175,00

¹⁶ PAEZ , J; Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Junio-2007.

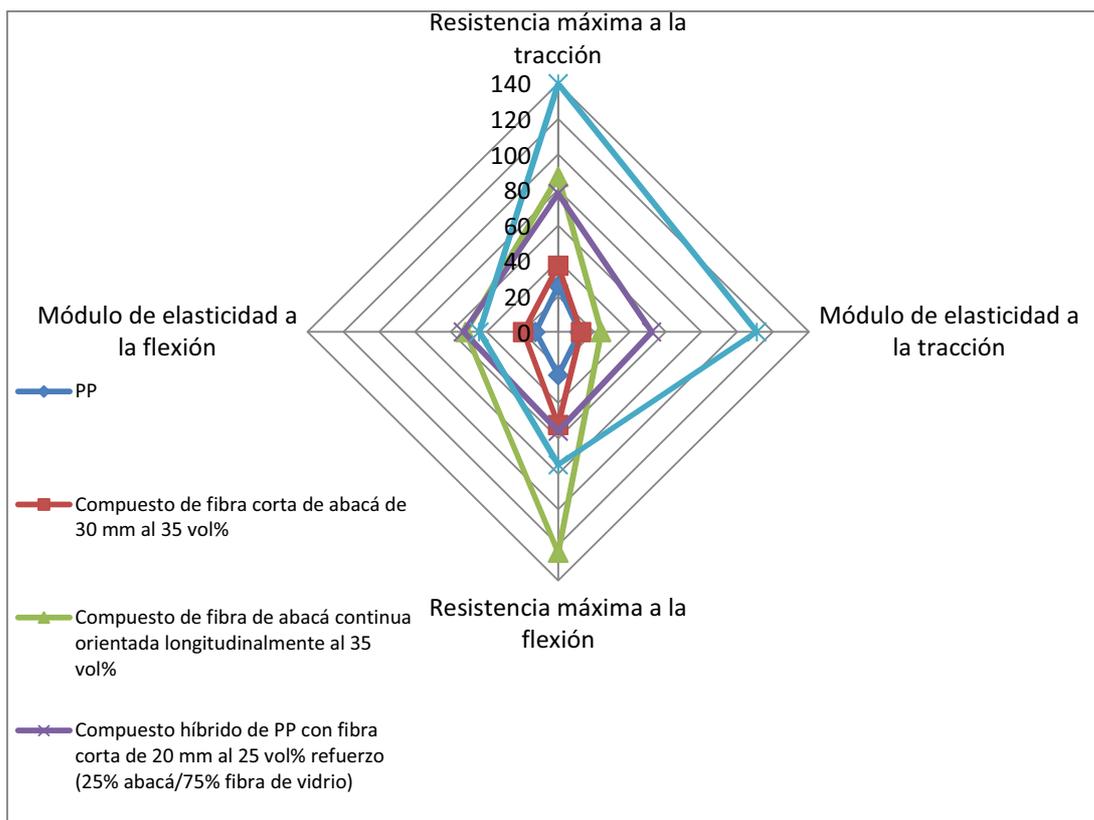


Figura 3.28. Gráfico radial de materiales compuestos PP/abacá frente a compuestos híbridos PP/abacá/fibra de vidrio en estudio.

3.7.4. Compuestos de poliéster reforzados con fibras de abacá

Los valores presentados en la Tabla 3.29 corresponden a las mejores formulaciones del estudio de materiales compuestos de poliéster reforzados con fibra de abacá. Al compararlos con las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción y flexión del compuesto híbrido que se estudia en este proyecto se tiene que la formulación poliéster/abacá, fibra corta 10 mm al 25 vol% es menor al esfuerzo máximo a tracción alcanzado por el compuesto híbrido PP/abacá/fibra de vidrio, fibra corta 20 mm al 25 vol% siendo éste superior en 2,6 veces. Así mismo, el híbrido supera al compuesto de poliéster en la resistencia a la flexión en un 15%. Sin embargo, para los materiales reforzados con fibra continua orientada longitudinalmente, ambos presentan similares valores de resistencia máxima a la tracción como se evidencia en la Figura 3.29. Finalmente, la resistencia máxima a flexión en el material compuesto con fibra de abacá continua longitudinal es mayor que la del compuesto híbrido en un 68%.

Tabla 3.29. Propiedades mecánicas de compuestos de poliéster reforzado con fibras de abacá.¹⁷

Tipo de material	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Resistencia máxima a la flexión [MPa]
Poliéster	37,17	60,41
Compuesto de fibra corta de abacá de 10 mm al 30 vol%	29,24	47,52
Compuesto de fibra corta de abacá de 10 mm al 25 vol%	25,76	51,80
Compuesto de fibra de abacá continua orientada longitudinalmente al 30 vol%	136,95	109,89
Compuesto de fibra de abacá continua orientada longitudinalmente al 25 vol%	120,34	107,00

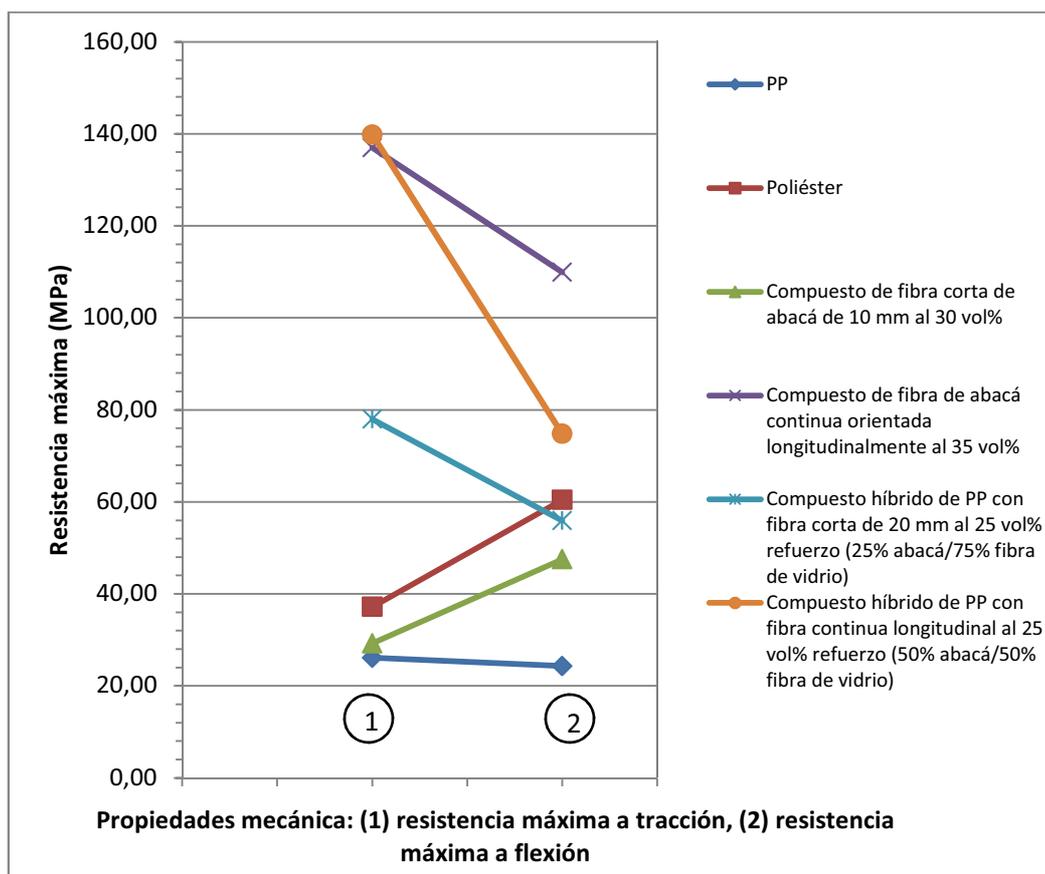


Figura 3.29. Diagrama de comparación de propiedades mecánicas de compuestos poliéster/abacá frente a materiales compuestos híbridos elaborados en el presente proyecto.

¹⁷ GUERRERO, V; et al.; Nuevos Materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Escuela Politécnica Nacional; Imprefepp; Quito-Ecuador, 2011.

3.7.5. Comparación de propiedades de diferentes compuestos híbridos reforzados con fibras naturales

En este ítem se encuentran las propiedades mecánicas que resultaron de los ensayos de tracción, flexión e impacto de once compuestos híbridos diferentes. Éstas propiedades se comparan con las del compuesto que presentó la mejor configuración de refuerzo híbrido abacá/vidrio/polipropileno (matriz polipropileno con refuerzo al 25 vol% de fibras de abacá – vidrio en proporción 50-50%), donde la fibra de abacá es continua orientada longitudinalmente.

Los materiales que se encuentran en las Tabla 3.30 y Tabla 3.31 son los siguientes:

- ¹ Compuestos híbridos de matriz polipropileno (CHMPP) reforzado al 30 vol% con partículas de madera y cascara de trigo (Upadhyaya, 2012)
- ² CHMP reforzado al 65 vol % con Fibras de Kenaf (25%) y vidrio (40%) (Jeyanthi, 2012)
- ³ Compuesto híbrido de matriz poliéster (CHMP) reforzado con fibras de coco y vidrio (Jayabal, 2010).
- ⁴ CHMP reforzados al 20 vol% con fibras de bagazo de palma y nanocompuestos de arcilla (Kalam, 2010).
- ⁵ CHMP reforzado al 20 vol% con fibras de yute (10%) y nuez de betel (10%) (Masudul, 2011)
- ⁶ Compuesto híbrido de matriz epóxica reforzado al 20 y 50 vol% con fibras de yute y bagazo de caña de azúcar (Kumar, 2009).
- ⁷ CHMP reforzado a 30 vol% con fibras de sisal y roselle (Athijayamani, 2009).
- ⁸ CHMP insaturado reforzado al 58 vol% con proporción sisal/lodo rojo de 38/20% (Singh, 1995).
- ⁹ CHMP reforzado al 61 vol% en proporción sisal/vidrio de 46/15% (Singh, 1995).
- ¹⁰ CHMP reforzado al 62 vol% en proporción sisal/vidrio/lodo rojo de 34/8/20% (Singh, 1995).
- ¹¹ CHMPP reforzado al 25 vol% con fibras de abacá/vidrio en proporción 50/50% (Cevallos, Tenesaca, 2012)

Tabla 3.30. Propiedades mecánicas de diferentes compuestos híbridos.

Propiedades mecánicas	Madera/Trigo/PP ¹	Kenaf/vidrio/PP ²	Coco/vidrio/poliéster ³	Palma de aceite/Nanocompuesto de arcilla/PP ⁴	Yute/ Betel/PP ⁵	Abacá/Vidrio/PP ¹¹
Resistencia máxima a la tracción [MPa]	30	135	47	32	170	140
Módulo de elasticidad a la tracción [MPa]	1809	7500	1453	3000	2700	11096
Resistencia máxima a la flexión [MPa]	38	170	65	64	70	75
Módulo de elasticidad a la flexión [MPa]	1324	7900	2881	3900	-	4415
Energía absorbida al impacto [kJ/m ²]	62 (J/m)	150 (J/m)	101,00	1,7	2,6	9,5

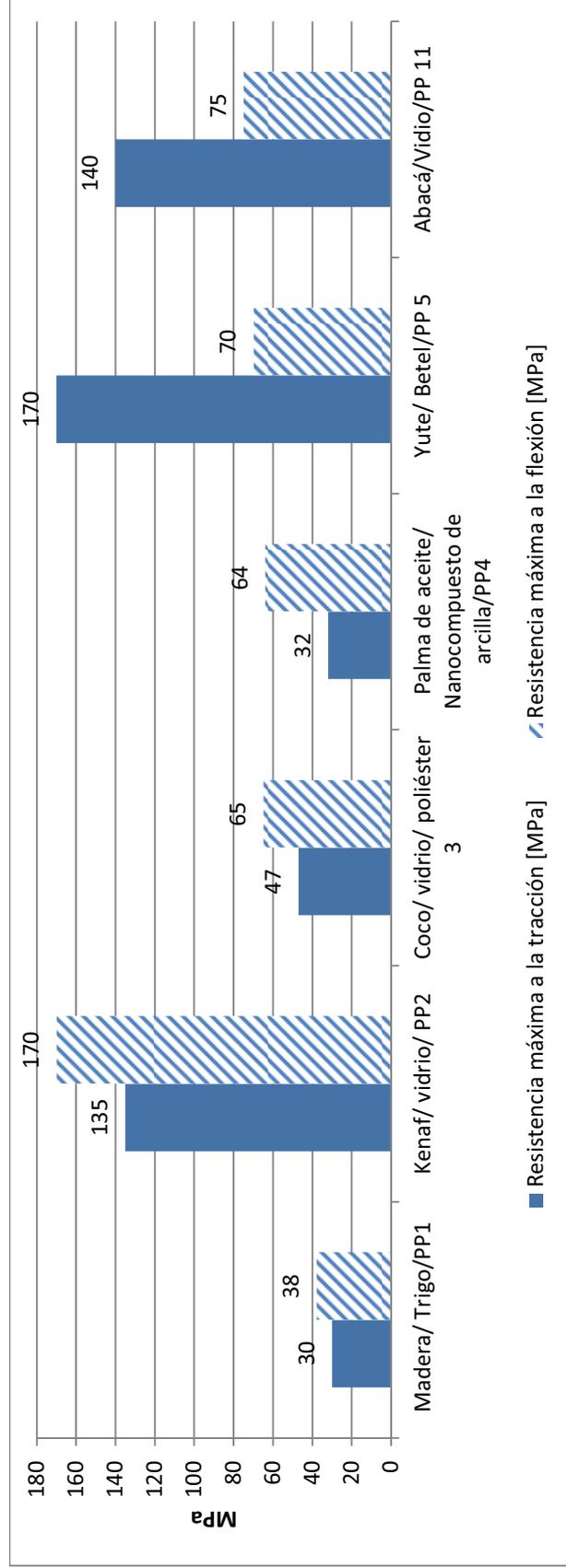


Figura 3.30. Comparación de la resistencia máxima a tracción y flexión del compuesto abacá/vidrio/PP frente a diferentes compuestos híbridos.

Tabla 3.31. Propiedades mecánicas de diferentes compuestos híbridos.

Propiedades mecánicas	Yute/Caña de azúcar/Epóxica ⁶		Roselle/Sisal/Poliéster ⁷	Sisal/Lodo rojo/Poliéster ⁸	Sisal/vidrio/poliéster ⁹	Sisal/Vidrio/Lodo rojo/Poliéster ¹⁰	Abacá/Vidrio/PP ¹¹
	20 vol%	50 vol%					
Resistencia máxima a la tracción [MPa]	16	23	59	24	65	45	140
Módulo de elasticidad a la tracción [MPa]	356	492	-	640	2600	3250	11096
Resistencia máxima a la flexión [MPa]	36	56	70	40	98	98	75
Módulo de elasticidad a la flexión [MPa]	789	1480	-	-	-	-	4415
Energía absorbida al impacto [kJ/m ²]	7,50	10,7	1,4	-	-	-	9,5

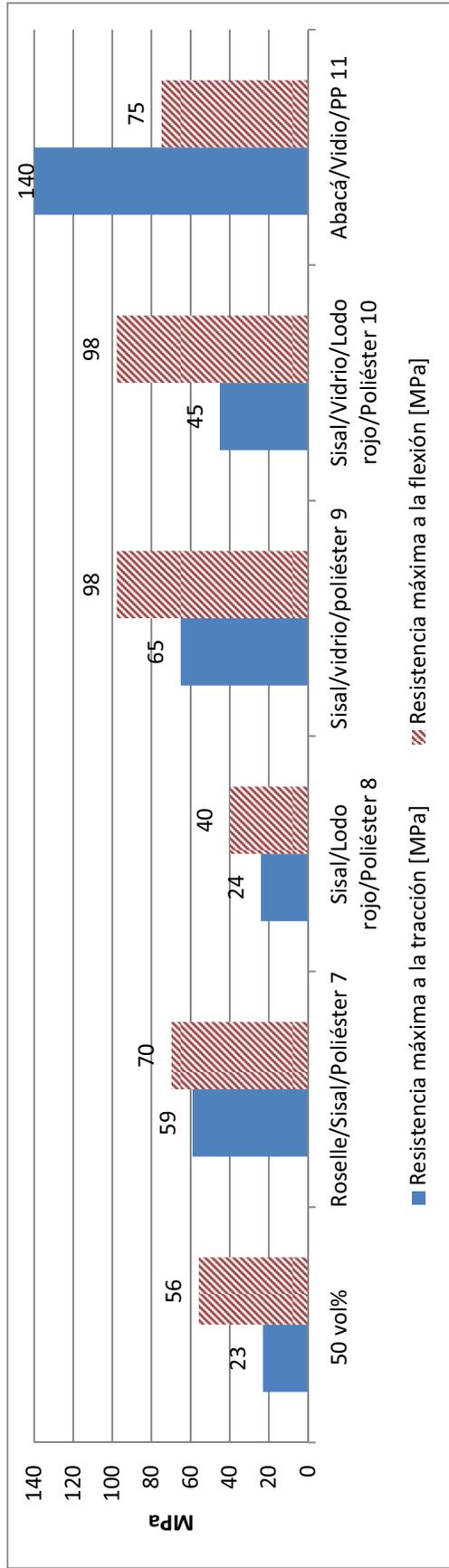


Figura 3.31. Comparación de la resistencia máxima a tracción y flexión del compuesto abacá/vidrio/PP frente a diferentes compuestos híbridos.

La combinación abacá/vidrio/propileno (ABP) de este proyecto formulada con refuerzo híbrido al 25 vol% de los cuales se tiene una proporción abacá/vidrio de 50/50%, ha demostrado tener mayores valores de resistencia a la tracción que los compuestos híbridos madera/trigo/PP, kenaf/vidrio/PP, coco/vidrio/poliéster, y palma/arcilla/PP en un 360%, 4%, 200%, 338%, respectivamente, como se muestra en la Figura 3.30. Estos materiales contienen mayores cantidades de refuerzo que el de abacá/vidrio/PP. La resistencia a la tracción del compuesto de yute/betel/PP con refuerzo del 20 vol% es superior al de abacá/vidrio/PP en un 12%. La tendencia de la resistencia máxima a la flexión es similar para los materiales antes mencionados pero en porcentajes menores. Al comparar la resistencia a tracción del material en estudio ABP con las de los siguientes materiales yuca/caña de azúcar/epóxica, roselle/sisal/poliéster, sisal/vidrio/poliéster y sisal/vidrio/lodo rojo/poliéster el ABP es superior en un 500%, 137%, 480%, 115% y 310%, respectivamente. De esta forma, como se observa en la Figura 3.31 que se mantiene la tendencia a mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos híbridos reforzados con fibras naturales cuando la proporción de refuerzo es inferior al 30 vol%. En la Figura 3.32 se visualizan las diferentes propiedades mecánicas que presentaron los compuestos híbridos mencionados en relación con el estudiado en este proyecto de titulación.

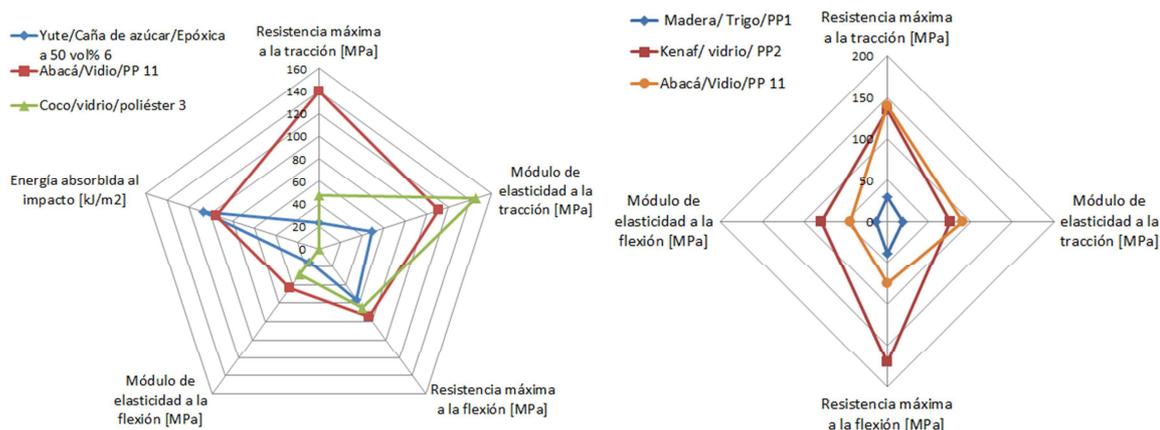


Figura 3.32. Propiedades mecánicas de compuestos híbridos reforzados con fibras naturales.

A continuación, se comparan las propiedades y el desempeño del compuesto híbrido con matriz PP en estudio, con otros compuestos híbridos reforzados con diferentes tipos de fibras naturales en matriz termoplástica. En las gráficas se encuentran las propiedades específicas de los compuestos híbridos.

Con los datos presentados en la Tabla 3.32, se puede apreciar que el compuesto híbrido elaborado en la EPN el cual corresponde a la configuración FL2503, presenta propiedades superiores a la de los diferentes compuestos híbridos y a la de su matriz. Al comparar las fibras de los compuestos se observa que la fibra de abacá contribuye con propiedades superiores a comparación de las fibras de yute y de nuez de betel. Estas a su vez superan a las fibras de kenaf y palma de aceite. Además, en la Figura 3.33 se aprecia la resistencia específica vs. módulo específico en tracción de los compuestos, donde la matriz utilizada en este proyecto fue más resistente que el compuesto híbrido de kenaf y vidrio.

Tabla 3.32. Propiedades específicas de compuestos híbridos de matriz polimérica.

	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Resistencia específica a la tracción [m^2/s^2] \times 1000	Módulo de elasticidad a la tracción [MPa]	Módulo específico [m^2/s^2] \times 1000	Resistencia máxima a la flexión [MPa]	Densidad [g/cm^3]
Madera/ Trigo/PP ¹	30	-	1809	-	38	-
Kenaf/ vidrio/ PP ²	135	108	7500	6000	170	1,25
Coco/ vidrio/ poliéster ³	47	-	1453	-	65	-
Palma de aceite/ Nanocompuesto de arcilla/PP ⁴	32	25	3000	2362	64	1,27
Yute/ Betel/PP ⁵	170	132	2700	2093	70	1,29
Yute/Caña de azúcar/Epóxica ⁶	16	-	356	-	36	-
Roselle/Sisal/Poliéster ⁷	59	-	-	-	70	-
Sisal/Lodo rojo/Poliéster ⁸	24	-	640	-	40	-
Sisal/vidrio/poliéster ⁹	65	-	2600	-	98	-
Sisal/Vidrio/Lodo rojo/Poliéster ¹⁰	45	-	3250	-	98	-
Abacá/Vidrio/PP (FL2503) ¹¹	140	127	11096	10087	75	1,1
Matriz de PP	26,12	29	1195	1328	24	0,9

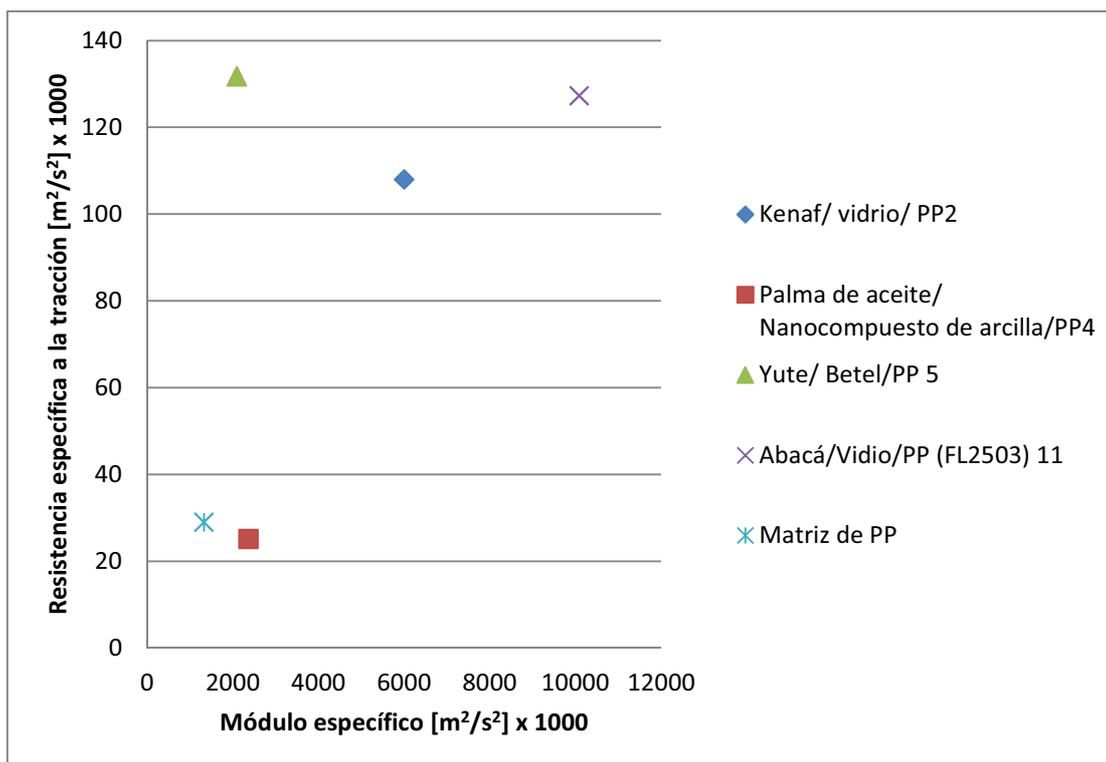


Figura 3.33. Resistencia específica vs. módulo específico a tracción de compuestos híbridos de matriz polipropileno.

Otras propiedades mecánicas que pueden compararse son la resiliencia y la tenacidad. El primero indica la densidad de energía de deformación del material, cuando se somete a esfuerzos hasta el límite de proporcionalidad cuyo valor se conoce como módulo de resiliencia u_r . Cabe recalcar que este módulo es igual al área bajo la curva de esfuerzo vs. deformación unitaria hasta el límite de proporcionalidad. De manera similar, la tenacidad es la capacidad de un material de absorber energía sin romperse. Su módulo de tenacidad u_t , es la densidad de energía de deformación cuando el material se somete a esfuerzos hasta el punto de falla. Es igual al área bajo la toda la curva esfuerzo vs. deformación unitaria. La Figura 3.34 presenta las curvas esfuerzo vs. deformación de los siguientes materiales: matriz polipropileno, fibra de abacá calidad 3, compuesto híbrido de referencia abacá/vidrio/poliéster al 20 vol% de refuerzo con fibras abacá/vidrio en proporción 50/50%, el compuesto FC252002 (matriz PP al 25 vol% refuerzo de fibras abacá/vidrio en proporción 25/75%) y el compuesto híbrido FL2503 (matriz PP al 25 vol% de refuerzo de fibras abacá/vidrio en proporción 50/50%). La figura mencionada anteriormente es usada para hallar las áreas bajo la curva dentro del

límite elástico para indicar el módulo de resiliencia y área bajo toda la curva para el módulo de tenacidad de los materiales citados. Estas propiedades se resumen en la Tabla 3.33 y Tabla 3.34.

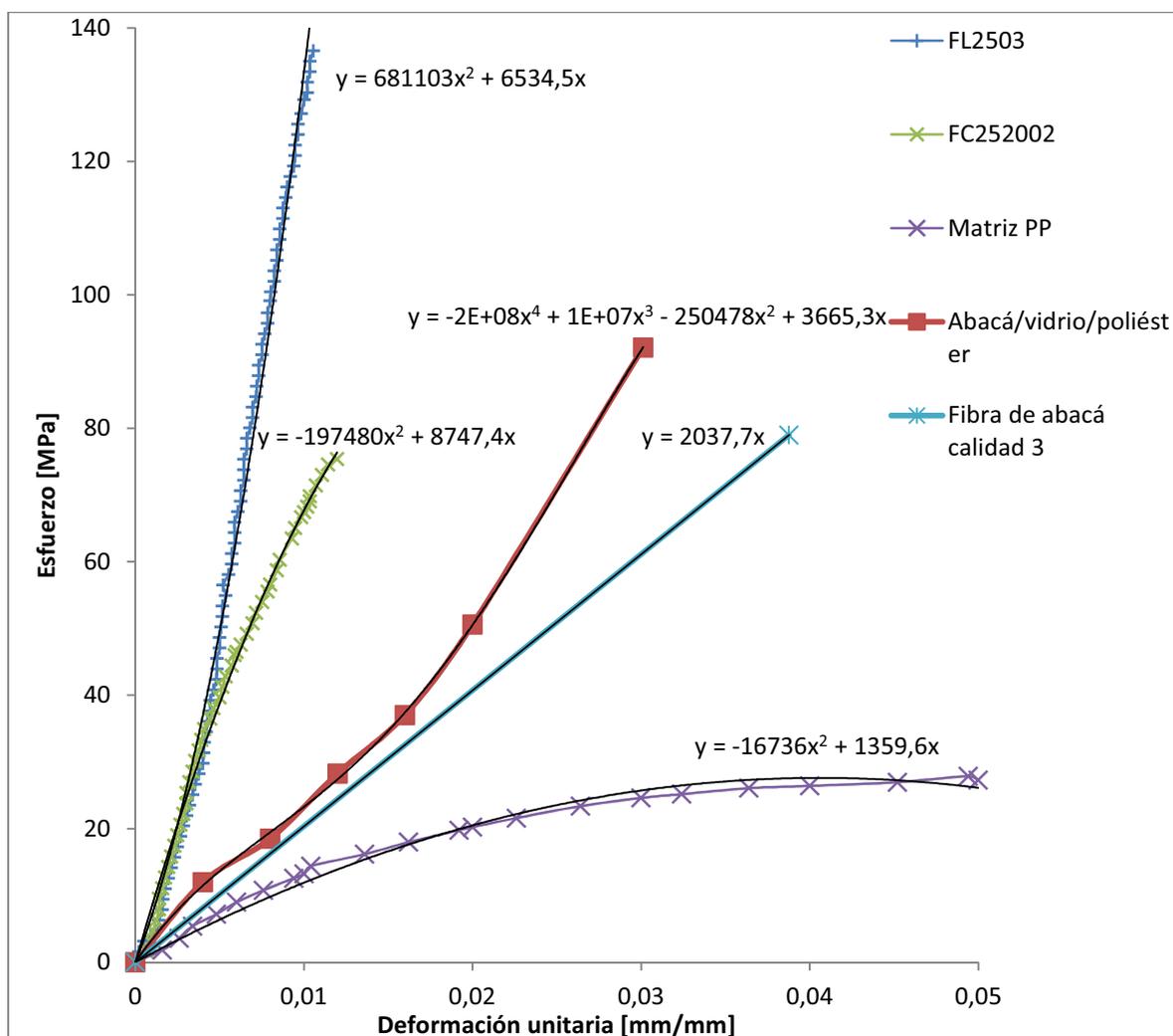


Figura 3.34. Curvas esfuerzo vs. deformación unitaria de diferentes materiales.

Tabla 3.33. Resiliencia de los materiales

Material	Ecuación	Límites [mm/mm]	Área bajo la curva o módulo de resiliencia [kJ/m ³]
Matriz PP	1113,6x	0 - 0,0072	30
FL2503	11924x	0 - 0,01036	640
FC252002	6741,2x	0 - 0,0060	120
Abacá/vidrio/poliéster	2750,4x	0 - 0,03012	1250
Fibra de abacá calidad 3	2037,7x	0 - 0,03877	1530

Tabla 3.34. Tenacidad de los materiales.

Material	Ecuación	Límites [mm/mm]	Área bajo la curva o módulo de tenacidad [kJ/m ³]
Matriz PP	$y = -16736 x^2 + 1359,6 x$	0 - 0,0494	990
FL2503	$y = 681103 x^2 + 6534,5 x$	0 - 0,01036	600
FC252002	$y = -197480 x^2 + 8747,4 x$	0 - 0,0114	470
Abacá/vidrio/poliéster	$y = -2E+08 x^4 + 1E+7 x^3 - 250478 x^2 + 3665,3x$	0 - 0,03012	450
Fibra de abacá calidad 3	$y = 2037,7 x$	0 - 0,03877	1730

La resiliencia y tenacidad de los materiales son comparados en la Figura 3.35. Se observa que la matriz de polipropileno tiene una buena tenacidad pero resiliencia baja. El compuesto FL2503 presenta mayor tenacidad que los compuestos de abacá/vidrio/poliéster y FC252002, lo que pone en evidencia que una mayor cantidad de fibra de vidrio como refuerzo contribuye a aumentar la tenacidad del material y lo hace más idóneo para aplicaciones que requieran resistencia a cargas de impacto. Sin embargo, un 25 vol% de refuerzo reduce en un 50% la resiliencia del material en comparación con menores cantidades de refuerzo. Además, se aprecia como la alta resiliencia de la fibra de abacá aumenta las resiliencia del material compuesto híbrido de matriz polipropileno.

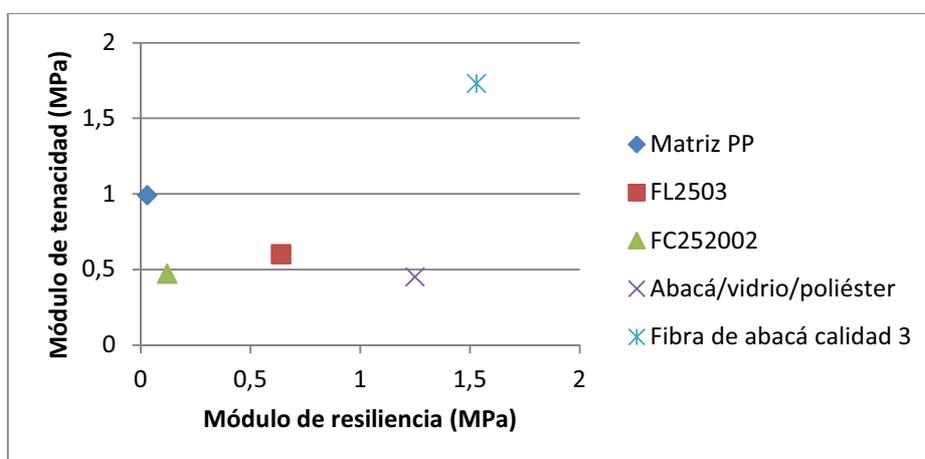


Figura 3.35. Módulo de tenacidad vs. módulo de resiliencia de diferentes materiales.

3.8. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

3.8.1. SELECCIÓN DEL PROTOTIPO

Para la selección del prototipo se empleó el método de criterios ponderados que se describió en el capítulo anterior. Mediante este método, se seleccionó entre las siguientes alternativas propuestas:

- Prototipo 1: Canilleras para jugadores de fútbol
- Prototipo 2: Paleta de entrenamiento para natación
- Prototipo 3: Jabonera

Para evaluar el peso de los criterios se realizó un análisis como el que se muestra en la Tabla 3.35 donde se comparó su importancia en la selección del prototipo y los valores asignados como indica a continuación:

1 : cuando el criterio de las filas fue superior que el de las columnas.

0,50 : cuando el criterio de las filas tuvo igual importancia que el de las columnas.

0 : cuando el criterio de las filas fue inferior que el de las columnas.

A continuación se presentan las valoraciones que se realizaron para cada criterio en particular de acuerdo a los prototipos propuestos como se muestra en las Tabla 3.35, Tabla 3.36, Tabla 3.37 y Tabla 3.38.

Tabla 3.35. Valoración de criterios de selección.

Criterio	Obtención	Costo	Caracterización	$\Sigma+1$	Ponderación
Obtención		1	0	2	0,33
Costo	0		0	1	0,17
Caracterización	1	1		3	0,50
			Suma	6	1

Tabla 3.36. Evaluación del peso específico del criterio *obtención*.

Criterio	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Prototipo 1		1	1	3	0,50
Prototipo 2	0		0	1	0,17
Prototipo 3	0	1		2	0,33
			Suma	6	1

Tabla 3.37. Evaluación del peso específico del criterio *costo*.

Criterio	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Prototipo 1		0	0	1	0,17
Prototipo 2	1		0	2	0,33
Prototipo 3	1	1		3	0,50
			Suma	6	1

Tabla 3.38. Evaluación del peso específico del criterio *funcionalidad*.

Criterio	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Prototipo 1		1	1	3	0,50
Prototipo 2	0		1	2	0,33
Prototipo 3	0	0		1	0,17
			Suma	6	1

Finalmente, la Tabla 3.39 muestra qué prototipo obtuvo la prioridad de selección más alta para ser construido con el material compuesto híbrido en estudio.

Tabla 3.39. Tabla de conclusiones.

Conclusiones	Obtención	Costo	Funcionalidad	Σ	Prioridad
Prototipo 1	0,50 x 0,33	0,17 x 0,17	0,50 x 0,50	0,444	1
Prototipo 2	0,17 x 0,33	0,33 x 0,17	0,33 x 0,50	0,277	3
Prototipo 3	0,33 x 0,33	0,50 x 0,17	0,17 x 0,50	0,279	2

Como se puede observar en la tabla anterior, el prototipo 1 (canillera para jugadores de fútbol) fue seleccionada, cabe señalar que las canilleras fueron sometidas a ensayos normalizados por la NOCSAE (National Operating Committee on Standards for Athletic Equipment) bajo la norma de impacto ND 090 – 06M07 para canilleras de fútbol.

A continuación se plantea la selección de la configuración de material compuesto híbrido más apta para este prototipo. El material compuesto híbrido que se utilizó para la fabricación de la canillera de fútbol, fue escogido mediante el método de

criterios ponderados. Los materiales con los que fueron fabricadas las canilleras se presentan en la Tabla 3.40 y sus propiedades mecánicas alcanzadas en los ensayos de tracción, flexión e impacto se muestran en la Tabla 3.41. Estos materiales propuestos son los mejores representantes de sus grupos al ser sometidos a fuerzas de impacto, tracción y flexión.

Tabla 3.40. Configuraciones de los posibles materiales para elaborar el prototipo.

No	Código	Fibra de abacá tipo	Vol% del refuerzo [%]	Fibra de vidrio [%]	Fibra de abacá [%]	Polipropileno [%]
1	FV25	-	25	100	0	75
2	FL2004	Fibra longitudinal 250 mm	20	25	75	80
3	FC252002	Fibra corta de 20 mm	25	75	25	75
4	FL2503	Fibra longitudinal 250 mm	25	50	50	75

Tabla 3.41. Propiedades mecánicas de las configuraciones.

Configuraciones de compuesto híbrido	Esfuerzo máximo tracción [MPa]	Módulo de elasticidad tracción [MPa]	Esfuerzo máximo flexión [MPa]	Módulo de elasticidad flexión [MPa]	Resistencia al Impacto [J]	Peso promedio de la probeta impacto [g]
FV25	111,52	6622,18	62,62	4335,36	12,37	6,4
FL2004	112,00	8299,40	54,77	2935,20	10,99	5,1
FC252002	77,98	5224,35	52,92	5288,40	9,99	6,1
FL2503	139,82	11096,3	74,78	4415,18	9,45	5,6

Los criterios de valoración que se consideraron determinantes al seleccionar los materiales para la construcción del prototipo se presentan en la Tabla 3.42 y se describen a continuación:

- Resistencia al impacto, porque asegura un desempeño adecuado en la protección de las canillas de los jugadores de fútbol.
- Peso, ya que la canillera sólo debe proteger la pierna del jugador a la vez que se minimice al máximo su presencia mediante bajo peso y una buena ergonomía.
- Precio, debido a que el costo de este producto debe competir con los de las canilleras existentes en el mercado.
- Facilidad de elaboración del compuesto híbrido, que invierte menos recursos para su elaboración.

Tabla 3.42. Valoración de los criterios de selección.

Criterio	Peso	Resistencia	Obtención	Precio	$\Sigma+1$	Ponderación
Peso		1	1	1	4	0,40
Resistencia	0		1	1	3	0,30
Obtención	0	0		0,5	1,5	0,15
Precio	0	0	0,5		1,5	0,15
				Suma	10	1

A continuación, se presentan las valoraciones que se realizaron para cada criterio en particular, de acuerdo a los materiales propuestos, como se muestra en las Tabla 3.43, Tabla 3.44, Tabla 3.45 y Tabla 3.46.

Tabla 3.43. Evaluación del peso específico *peso*.

Criterio	FL2004	FL2503	FC252002	FV25	$\Sigma+1$	Ponderación
FL2004		1	1	1	4	0,40
FL2503	0		1	1	3	0,30
FC252002	0	0		1	2	0,20
FV25	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1

Tabla 3.44. Evaluación del peso específico *resistencia al impacto*.

Criterio	FL2004	FL2503	FC252002	FV25	$\Sigma+1$	Ponderación
FL2004		1	1	0	3	0,30
FL2503	0		0	0	1	0,10
FC252002	0	1		0	2	0,20
FV25	1	1	1		4	0,40
				Suma	10	1

Tabla 3.45. Evaluación del peso específico *facilidad de elaboración*.

Criterio	FL2004	FL2503	FC252002	FV25	$\Sigma+1$	Ponderación
FL2004		0	0	0	1	0,10
FL2503	1		0	0	2	0,20
FC252002	1	1		1	4	0,40
FV25	1	1	0		3	0,30
				Suma	10	1

Tabla 3.46. Evaluación del peso específico *precio*.

Criterio	FL2004	FL2503	FC252002	FV25	$\Sigma+1$	Ponderación
FL2004		1	1	1	4	0,40
FL2503	0		1	1	3	0,30
FC252002	0	0		1	2	0,20
FV25	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1

Tabla 3.47. Tabla de conclusiones de selección del material compuesto híbrido.

Conclusiones	Peso	Resistencia	Facilidad	Precio	Σ	Prioridad
FL2004	0,4 x 0,4	0,3 x 0,3	0,1 x 0,15	0,4 x 0,15	0,325	1
FL2503	0,3 x 0,4	0,1 x 0,3	0,2 x 0,15	0,3 x 0,15	0,225	3
FC252002	0,2 x 0,4	0,2 x 0,3	0,4 x 0,15	0,2 x 0,15	0,230	2
FV25	0,1 x 0,4	0,4 x 0,3	0,3 x 0,15	0,1 x 0,15	0,220	4

De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 3.47, el material con prioridad 1 para la elaboración del prototipo es el compuesto híbrido de matriz polipropileno, con 20% de refuerzo, con un porcentaje de 25% de fibra de vidrio y 75% de fibra longitudinal de abacá. También se seleccionó el material de prioridad 2, es decir el material que tiene 25% de refuerzo (75% fibra de vidrio/25% fibra corta de abacá de 20 mm) para la elaboración del prototipo debido a que tiene mayor facilidad de elaboración.

3.8.2. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

La determinación de la temperatura de ablandamiento se definió a partir de una comparación visual en la curvatura de la canillera fabricada con el modelo original. En la Tabla 3.48 se observan las curvaturas que se dieron a diferentes temperaturas.

Tabla 3.48. Parámetros de calentamiento ensayados para termoformado.

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Observaciones	Imagen
A	90	10	Temperatura muy baja. Recuperación de la deformación aplicada.	
B	150	6	No se llegó a la curvatura del modelo original.	
C	160	5	Se alcanzó la curvatura del molde original.	

La temperatura ideal fue de 160°C durante cinco minutos en la plancha calefactora, una vez cumplido ese tiempo se trasladó inmediatamente a la matriz, para aplicar la presión de moldeo de 15 psi durante un tiempo aproximado de cinco minutos. El prototipo se elaboró de acuerdo al diagrama de la Figura 3.36.

No.	Actividad	Operación				Tiempo	Notas
		Operación	Transporte	Inspección	Almacenamiento		
1	Almacenamiento y corte de las fibras de abacá	○	↑	□	▽	60 minutos	
2	Secado de las fibras de abacá	○	↑	□	▽	120 minutos	Ver Figura 3.4
3	Corte de la fibra de vidrio	○	↑	□	▽	5 min	
4	Fabricación de láminas de polipropileno	○	↑	□	▽	30 min	Ver Figura 3.8
5	Inspección en busca de defectos	○	↑	□	▽	10 s	Para cada lámina
6	Fabricación de láminas de material compuesto híbrido	○	↑	□	▽	30 min	Ver Tabla 3.9
7	Transporte de láminas	○	↑	□	▽	1 min	Prensa caliente - prensa fría
8	Colocación del molde en la prensa	○	↑	□	▽	3 min	
9	Inspección del acabado	○	↑	□	▽	20 s	
10	Corte de láminas de material compuesto híbrido	○	↑	□	▽	5 min	
11	Lijado de bordes	○	↑	□	▽	5 min	
12	Calentamiento	○	↑	□	▽	2 - 5 min	Ver Tabla 3.42
13	Termoformado láminas material compuesto híbrido	○	↑	□	▽	1 min	
14	Inspección del acabado	○	↑	□	▽	15 s	
15	Colocación del fomix	○	↑	□	▽	2 min	
16	Almacenamiento del producto	○	↑	□	▽	-	

Figura 3.36. Diagrama de flujo del proceso de producción del prototipo.

3.8.3. ESTIMACIÓN DEL COSTO DE LA CANILLERA DE MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

Para dar un estimado del costo de la canillera se tomó en cuenta algunos factores de fabricación, entre ellos: los costos de fabricación del molde, de la materia prima, el costo de mano de obra y de los servicios básicos. Para este análisis se tomó en cuenta la producción por par de canilleras obtenidas a partir de una lámina de compuesto híbrido. Es conveniente señalar que las láminas del nuevo material fueron elaboradas con un espesor de 2 mm. Esta lámina fue la seleccionada para la construcción de prototipo y su configuración es: polipropileno al 20 vol% de refuerzo híbrido (25% fibra de vidrio/75% fibra de abacá continua longitudinal).

Para el siguiente análisis de costos se evaluó el costo unitario en dólares por gramo de materia prima. Se calculó la cantidad de material requerido en gramos para la elaboración de una lámina de material compuesto híbrido, a partir de la cual se pueden extraer dos canilleras. Primero se estimaron los costos por concepto de materia prima que se muestran en la Tabla 3.49.

Tabla 3.49. Estimación de costos de la materia prima.

	Concepto	Costo unitario (USD/g)	Cantidad de material por prototipo (g)	Costo total (USD)	Costo A (USD)
Materia prima	Polipropileno	0,002000	81,91	0,16	0,21
	Fibra de abacá	0,001200	22,06	0,03	
	Fibra de vidrio	0,001615	14,42	0,02	

De manera similar, en la Tabla 3.50 se indican la estimación de costos por maquinado y materia prima para la elaboración del molde tipo macho-hembra el cual se utilizó para la fabricación de las láminas del compuesto híbrido.

Tabla 3.50. Estimación de costos del molde tipo macho-hembra.

Máquina	Tiempo [h]	Costo maquinado [USD/h]	Total maquinado [USD]	Costo mano de obra [USD/h]	Total mano de obra [USD]	Total [USD]
Limadora	4	10	40	10	40	305
Fresado	10	8	80	5	50	
Rectificado	10	5	50	4	40	
Taladrado	1	3	3	2	2	
		Total [USD]	173		132	
Materia prima						
Material	Cantidad	Precio unitario [USD/kg]	Peso [kg]	Total [USD]		
Placa base acero ASTM A36 de 260 x 250 x 7,5 mm	2	1,80	5	32,40		
Platina de acero ASTM A36 de 250 x 40 x 9 mm	4	1,80	2			

En la Tabla 3.51 se presenta la estimación de los costos de la matriz para termoformado en el cual se elaboraron las canilleras de fútbol con el material en estudio.

Tabla 3.51. Estimación de costos de la matriz para las canilleras.

Máquina	Tiempo [h]	Costo maquinado [USD/h]	Total maquinado [USD]	Costo mano de obra [USD/h]	Total mano de obra [USD]	Total [USD]
Fresado	2	15	30	20	40	176
Torneado	2	10	20	10	20	
Rectificado	3	8	24	8	24	
Taladrado	2	5	10	4	8	
		Total [USD]	84		92	
Materia prima						
Material	Cantidad	Precio unitario [USD/kg]	Peso [kg]	Total [USD]		
Placa base acero ASTM A36 de 220 x 220 x 6 mm	2	1,80	6	60,80		

Continuación de la Tabla 3.51.

Material	Cantidad	Precio unitario [USD/kg]	Peso [kg]	Total [USD]
Platina acero ASTM A36 de 80 x 110 x 180 mm	2	1,80	2	60,80
Columnas en hierro común de ½ in de diámetro en acero ASTM A36	4	4	2	

En la Tabla 3.52 se encuentra el detalle de los costos de operación de los equipos que incluye el consumo de energía de la estufa y la prensa calefactora. También se encuentra el tiempo de operación para la obtención de las láminas del compuesto híbrido.

Tabla 3.52. Estimación de costos de operación de los equipos.

	Concepto	Costo de operacional (USD / horas)	Tiempo de operación (horas)	Costo total (USD)	Costo B (USD)
Equipos	Estufa	0,500	2,00	1,00	1,83
	Prensa calefactora	1,000	0,75	0,75	
	Prensa hidráulica	0,100	0,20	0,02	
	Molde para laminas	0,035	1,10	0,04	
	Molde para prototipo	0,045	0,50	0,02	

Para determinar el costo de mano de obra en la obtención del prototipo se tomó en cuenta el tiempo de los procesos mostrados en la Tabla 3.53.

Tabla 3.53. Costo de mano obra y costo final del prototipo.

	Procesos	Tiempo operativo (horas)	Tiempo total	Honorarios (USD/hora)	Costo C (USD)
Mano de obra	Preparación de las fibras	3,00	4,65	2,00	9,30
	Elaboración de laminas de polipropileno	0,50			
	Elaboración de laminas de material compuesto híbrido	0,75			
	Termoformado del prototipo	0,40			
Costo final (USD)= Costo A + Costo B + Costo C					11,34

El costo de obtención de un par de canilleras de material compuesto híbrido es la suma de los costos A, B y C, correspondientes a la materia prima, operación de equipos y mano de obra, respectivamente y es igual a 11,34 dólares. Un par de canilleras en el mercado tienen un costo promedio de 18,00 dólares.

Al obtener láminas de un espesor bajo, el tiempo de obtención de las canilleras disminuyó debido a la facilidad de elaboración, con lo que se redujo el costo de la mano de obra.

3.9. CARACTERIZACION DEL PROTOTIPO

En las Tablas 3.54, 3.55 y 3.56 se presentan las deformaciones promedio de la plastilina que se dieron al realizar el ensayo de impacto en la zona central de las canilleras. No se presentan datos de las zonas laterales debido a la dificultad que se presentó al ubicar la plastilina en dichas zonas para ser ensayada con el impactador de 5 kg.

En el segundo ensayo de impacto, en el que se empleó un yunque que simula la pierna de los jugadores, si se realizó el impacto en las zonas laterales. En las tablas mencionadas, se presentan los resultados en la columna de “ruptura” y se registró si existió o no algún tipo de fractura.

Tabla 3.54. Resultados finales del ensayo de impacto en la canillera de referencia.

Canillera de referencia						
	Altura promedio de ensayo (mm)	Análisis con plastilina			Ruptura	
		Altura inicial promedio (mm)	Altura final promedio (mm)	Deformación (mm)	Si	No
Zonas laterales	10	-	-	-		X
	30	-	-	-		X
	60	-	-	-		X
Zona central	120	26,80	10,33	16,47		X
	150	26,43	9,62	16,81		X
	180	26,63	8,95	17,68		X

Tabla 3.55. Resultados finales del ensayo de impacto en la canillera con el material compuesto híbrido con refuerzo al 25 vol% de fibra corta de abacá de 20 mm.

Canillera del material compuesto híbrido (FC252002)						
	Altura promedio de ensayo (mm)	Análisis con plastilina			Ruptura	
		Altura inicial promedio (mm)	Altura final promedio (mm)	Deformación (mm)	Si	No
Zonas laterales	10	-	-	-		X
	30	-	-	-		X
	60	-	-	-		X
Zona central	120	27,84	11,50	16,34		X
	150	26,73	9,72	17,01		X
	180	27,71	10,57	17,14		X

Tabla 3.56. Resultados finales del ensayo de impacto en la canillera con el material compuesto híbrido al 20 vol% de fibra continua de abacá.

Canillera del material compuesto híbrido (FL2004)						
	Altura promedio de ensayo (mm)	Análisis con plastilina			Ruptura	
		Altura inicial promedio (mm)	Altura final promedio (mm)	Deformación (mm)	Si	No
Zonas laterales	10	-	-	-		X
	30	-	-	-		X
	60	-	-	-		X
Zona central	120	28,79	10,77	18,02		X
	150	28,26	9,04	19,23		X
	180	28,30	8,32	19,89		X

Con las deformaciones obtenidas del primer ensayo de impacto con la plastilina ubicada debajo de la canillera, se llegó a la conclusión de que el material híbrido FC252002 tiene menor deformación que la canillera modelo y que la de material híbrido FL2004.

En las tablas anteriores se observa que en el ensayo de ruptura, las canilleras elaboradas con los materiales híbridos y la canillera modelo, no sufrieron deformaciones ni fisuras a ninguna altura de ensayo tanto en zona central como en lateral. Con estos resultados se decidió aumentar las alturas a 600, 800 y 1000 mm como se ve en la Tabla 3.57. El tipo de falla que presentó la canillera modelo a 1000 mm fueron abolladuras en el fómix protector entre la pierna y la canillera como se puede ver en la Figura 3.37. Este tipo de falla no se apreció visualmente en las canilleras de material compuesto híbrido.



Figura 3.37. Canillera modelo ensayada.

Tabla 3.57. Determinación de fallas a diferentes alturas para canilleras sobre el yunque.

ALTURAS (mm)	Canillera modelo		FC252002		FL2004	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
10		x		x		x
30		x		x		x
60		x		x		x
120		x		x		x
150		x		x		x
180		x		x		x
600		x		x		x
800		x		x		x
1000	x			x		x

Luego de obtener estos resultados se realizaron ensayos en los cuales se utilizó como impactador una esfera de acero de 533 g y 51 mm de diámetro. El objetivo fue determinar si este impactador permitía apreciar alguna deformación en el fómix de las canilleras de material compuesto híbrido. Los resultados de los ensayos mostraron que a partir de los 180 mm existen deformaciones en el fómix causadas por el impacto entre la esfera y el yunque.

Además, se ensayó a la canillera sin yunque de tal forma que el impacto se dio directamente en el fómix para analizar el tipo de efecto que produce en la canillera. Estos ensayos se realizaron a 180 y 1000 mm de altura y presentaron las fallas que se muestran en la Figura 3.38.

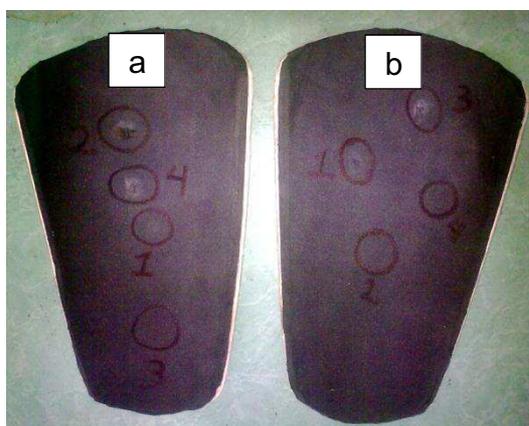


Figura 3.38. Canilleras de material compuesto híbrido ensayadas: (a) fibra continua abacá al 20 vol% de refuerzo (75% abacá / 25% vidrio); (b) fibra corta de abacá al 25 vol% de refuerzo (25% abacá / 75% vidrio).

Los ensayos realizados permitieron comparar visualmente la deformación que el impactador produce en el fómix de las canilleras de material compuesto híbrido y del modelo original. Las deformaciones producidas en el fómix indicó un claro indicio de cómo puede afectar el impacto en la pierna de un jugador al comparar visualmente la profundidad que el impactador dejó en el fómix y la facilidad o dificultad que tiene éste a recuperar su forma.

En la Figura 3.38a se aprecian los ensayos realizados a la canillera de material compuesto híbrido al 20 vol% refuerzo de fibra continua de abacá con 25% fibra de vidrio (FL2004). A continuación en la Tabla 3.58, se describen los diferentes efectos producidos con el impactador de acero en las diferentes zonas de impacto.

Tabla 3.58. Descripción de los efectos producidos en el compuesto híbrido FL2004 por el impactador de acero.

Impacto	Altura de impacto (mm)	Descripción	Resultados
1	180	Impacto en el fómix	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación leve con recuperación del fómix. • Ni interna ni externamente existieron fisuras en el material compuesto híbrido.
2	1000	Impacto en el fómix	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación profunda sin recuperación del fómix. • Existieron internamente fisuras en el material compuesto híbrido.
3	180	Impacto en el compuesto, canillera sobre el yunque	<ul style="list-style-type: none"> • No se apreció deformación en el fómix, existió recuperación del fómix. • No se apreció fisuras en el material compuesto híbrido.
4	1000	Impacto en el compuesto, canillera sobre el yunque	<ul style="list-style-type: none"> • Se apreció deformación con una profundidad menor que en el impacto 2 y mayor que la producida por el impacto 1 sin recuperación del fómix. • No existieron fisuras en el material compuesto híbrido.

En la Figura 3.38b se aprecian los ensayos realizados a la canillera de material compuesto híbrido al 25 vol% refuerzo de fibra corta de abacá de 20 mm y con 75% fibra de vidrio (FC252002). A continuación en la Tabla 3.59, se describen los diferentes efectos producidos por el impactador de acero en las diferentes zonas de impacto.

Tabla 3.59. Descripción de los efectos producidos en el compuesto híbrido FC252002 por el impactador de acero.

Impacto	Altura de impacto (mm)	Descripción	Resultados
1	1000	Impacto en el fómix	<ul style="list-style-type: none"> • Se apreció un hundimiento leve del fómix. • Ni interna ni externamente existieron fisuras en el material compuesto híbrido. • Al compararlo con la canillera de la configuración FL2004 (impacto 2), a las mismas condiciones de ensayo se observó un mayor hundimiento en esta última configuración.
2	180	Impacto en el fómix	<ul style="list-style-type: none"> • Se apreció una deformación leve con recuperación del fómix. • No existieron fisuras internas ni externas en el material.
3	1000	Impacto en el compuesto, canillera sobre el yunque	<ul style="list-style-type: none"> • Se apreció una deformación con una profundidad menor que en el impacto 1 con recuperación del fómix. • No se apreció fisuras en el material compuesto híbrido.
4	180	Impacto en el compuesto, canillera sobre el yunque	<ul style="list-style-type: none"> • No se apreció deformación en el fómix, existió recuperación del mismo. • No existieron fisuras en el material compuesto.

En conclusión, al comparar las canilleras de material compuesto híbrido con la canillera modelo, se determinó que para el ensayo con plastilina los compuestos híbridos tuvieron deformaciones que estadísticamente fueron iguales a la canillera modelo, aunque la deformación fue menor para el caso del material híbrido FC252002. Esto sucedió al impactar la canillera con la esfera de 5 kg y a la altura recomendada por la norma de 150 mm.

Para el ensayo de impacto con la esfera de 5 kg y el yunque, no se observó ninguna deformación o fisura alguna en el material de la canillera modelo ni en los compuestos híbridos a las alturas recomendadas por las normas. Luego de realizar estos ensayos con el control de los parámetros establecidos en la norma NOCSAEND 090 – 06M07 se determinó que los materiales compuestos híbridos sí cumplen con los requerimientos de la norma.

Se realizó un tercer ensayo para definir una altura a la cual se dé una deformación o fractura del compuesto híbrido, sin embargo, ni a las alturas establecidas por la norma ni a alturas de prueba mayores se presentó ninguna fractura en el compuesto híbrido.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se ha comprobado que la adición de fibras de abacá y fibra de vidrio a la matriz de polipropileno mejora las propiedades mecánicas de los materiales como el polipropileno, pero se limita el porcentaje de elongación respecto a este material.
- Al realizar el análisis de humedad de las materias primas, se comprobó que los pellets de polipropileno tienen aproximadamente 0% de humedad y las fibras de abacá tienen una humedad de 2,17%. Este estudio determinó que la humedad de la fibra fue la responsable de la aparición de burbujas internas dentro del compuesto.
- Para la elaboración de compuestos híbridos se fabricaron láminas de matriz polipropileno (PP). Las condiciones que se aplicaron para la fabricación de las mismas fueron: presión de moldeo de 91 psi, tiempo de moldeo de 22 minutos y temperatura de 185°C (365°F) en las placas de la prensa calefactora. El enfriamiento se llevó a cabo en una prensa hidráulica a 12 psi durante 15 minutos.
- Se comprobó que los parámetros en el proceso de obtención de los materiales compuestos de PP/abacá y de los compuestos híbridos fueron los mismos: presión de moldeo de 25 psi, tiempo de moldeo de dos a cinco minutos a una temperatura de 185°C. El enfriamiento se dio en una prensa hidráulica a 1000 psi y temperatura ambiente durante 15 minutos.
- Con los parámetros establecidos, las condiciones del proceso y la configuración tipo sándwich (con láminas de matriz y refuerzo), permitieron obtener un material compuesto híbrido libre de defectos tales como: micro burbujas internas de aire, degradación de la matriz, rugosidad superficial, flejado general de las láminas y degradación de la fibra.

- El nuevo material obtenido en forma de láminas presentó excelentes propiedades de moldeabilidad para elaborar artículos por termoformado.
- El prototipo fabricado con el material híbrido de fibra corta de abacá FC252002 presentó menor deformación que la canillera modelo elaborada con materiales convencionales (PP) y que la del material híbrido elaborado con fibra de abacá continua longitudinal.
- El uso de compuestos híbridos como material base para la fabricación de artículos de consumo, supone una reducción de precios al final del proceso de manufactura. En el caso particular de la elaboración de canilleras en este estudio, se obtuvo una reducción de un 40% en el precio final de la misma al compararla con las existentes en el mercado que han sido fabricadas con materiales convencionales.
- Los datos obtenidos de la caracterización mecánica tanto de las probetas de polipropileno puro como de las de compuesto híbrido, mostraron una distribución normal para todas las propiedades evaluadas. Los resultados obtenidos se indican a continuación:

Tracción

- Las curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados a la matriz polipropileno así como también a los materiales compuestos híbridos, registraron una tendencia lineal, esto quiere decir, que el nuevo material tiene un bajo porcentaje de elongación pero alta resistencia en comparación con la matriz pura.
- La configuración del compuesto híbrido que presentó mayor resistencia a la tracción fue el de 0,25 de fracción volumétrica con una configuración de refuerzo híbrido de: 50% de fibra continua longitudinal de abacá y 50% de fibra de vidrio tipo mat (FLA50FV50). La resistencia al esfuerzo máximo a tracción de este material fue de 145 MPa, aproximadamente 5 veces mayor que la matriz (26 MPa).

De manera similar, el módulo de elasticidad de este nuevo material fue de 11096 MPa, aproximadamente 9 veces mayor al que presentó la matriz polipropileno pura (1195 MPa).

- El material compuesto híbrido con el 25% de refuerzo y configuración FLA50FV50 presentó 5 veces más resistencia a la tracción en comparación con la matriz de polipropileno sin refuerzo aproximadamente 1,3 veces más que el material compuesto reforzado con el 25% de fibra de vidrio y 2 veces más resistencia que el compuesto híbrido con 25% de refuerzo de fibra corta de abacá de 20 mm.
- Existe una diferencia de 9 a 1 entre la configuración de mayor módulo de elasticidad FLA50FV50 y la matriz polipropileno cuando fueron sometidas a esfuerzos de tracción.

Flexión

- El compuesto reforzado con fibra continua de abacá al 25%, registra 3 veces más resistencia a la flexión que la matriz polipropileno pura. Se destaca también la configuración que tiene 0,25 de fracción volumétrica de refuerzo: fibra corta de abacá de 10 mm al 75% y fibra de vidrio al 25%, la misma que tiene más de 2 veces la resistencia a la flexión que la matriz sin refuerzo. Estas mismas configuraciones reportaron valores superiores a la matriz en cuanto a su módulo de elasticidad en los ensayos de flexión, siendo el módulo del compuesto de fibra continua 5 veces mayor que el módulo de la matriz y el del material reforzado con fibra corta de abacá de 10 mm, casi 4 veces mayor que el de polipropileno sin refuerzo.
- El comportamiento de este nuevo material en todas sus configuraciones de refuerzo es frágil tal y como se evidencia en sus curvas de esfuerzo vs. deformación.

- No existe diferencia estadística en las deformaciones que presentan las diferentes configuraciones de material compuesto híbrido y su matriz polipropileno cuando fueron sometidas a ensayos de flexión.

Impacto

- En el caso de los ensayos de impacto, se registró una diferencia de 3 a 1 entre el material compuesto que tiene 0,25 de fracción volumétrica de refuerzo de fibra de vidrio y la matriz polipropileno sin refuerzo. Por otra parte, el compuesto de fibra corta de abacá de 20 mm como refuerzo al 25%, es más de 2 veces más resistente al impacto que la matriz. También se obtuvieron buenos resultados al impacto con materiales reforzados con un refuerzo híbrido de 0,20 de fracción volumétrica con 75% de fibra continua longitudinal de abacá y 25% fibra de vidrio. Esta última configuración fue 3 veces más resistente al impacto que la matriz polipropileno.
- El compuesto híbrido aquí estudiado, presenta una combinación de las propiedades del abacá/vidrio/polipropileno que supera aquellas presentadas por otros estudios sobre compuestos híbridos con fibras naturales como palma de aceite/nanocompuesto de arcilla/PP, madera/trigo/PP y comparable con las propiedades del material compuesto kenaf/vidrio/PP. Sin embargo, las propiedades del compuesto de matriz polipropileno y refuerzo de fibras de yute/betel superan al compuesto abacá/vidrio/PP en un 18% en cuanto a su resistencia máxima a la tracción pero con resistencias a la flexión similares.
- El compuesto FL2503 presenta mayor tenacidad que los compuestos de abacá/vidrio/poliéster y FC252002, lo que pone en evidencia que una mayor cantidad de fibra de vidrio como refuerzo contribuye a aumentar la tenacidad del material y lo hace más idóneo para aplicaciones que requieran resistencia a cargas de impacto. Sin embargo, un 25 vol% de refuerzo reduce en un 50% la resiliencia del material en comparación con menores cantidades de refuerzo.

4.2. RECOMENDACIONES

- Obtener y evaluar las propiedades mecánicas del material compuesto híbrido de matriz polipropileno reforzado al 25 vol%, 50% fibra de vidrio y 50% fibra de abacá orientada a 45°.
- Definir nuevos métodos de procesamiento más eficientes que permitan obtener el nuevo material con un menor tiempo de fabricación e incrementar la complejidad de los artículos de consumo.
- Experimentar con tratamientos especiales a las fibras de abacá en busca de mejorar la adhesión de las mismas a la matriz polipropileno. De esta manera se transmitirían de mejor manera los esfuerzos mecánicos en el material compuesto híbrido.
- Comprobar el efecto que tendrían otras fibras naturales como la fibra de coco, cabuya, o similares en el refuerzo híbrido en remplazo de la fibra de abacá.
- Efectuar estudios que evidencien los efectos que tendría el uso de fibra de vidrio como refuerzo en formas distintas al mat como tejidos o al granel en combinación con la fibra de abacá en una matriz de polipropileno.
- Realizar prototipos que empleen el nuevo material compuesto híbrido con formas más complejas, es decir, con curvaturas mas pronunciadas y verificar su desempeño como elemento estructural.
- Se recomienda realizar un estudio de mercado para determinar la factibilidad de comercializar canilleras elaborados con materiales compuestos híbridos como el propuesto en este estudio.
- El producto fabricado con este nuevo material se debe someter a más pruebas de confort y ajuste anatómico que evite molestias a los jugadores.
- Para la elaboración de las láminas de material compuesto híbrido y del prototipo se recomienda el uso de equipo de protección adecuado para las operaciones requeridas.

Bibliografía

- [1] Carolina Llano Uribe. (2011, Junio) Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario. [Online]. <http://es.scribd.com/doc/57153029/MATERIALES-DE-USO-AERONAUTICO>
- [2] M. Sánchez and I. Campos, *Tecnología de materiales*, Primera ed. México, D.F., México: Editorial Trillas, 2010.
- [3] J. Béguin. (2011, Octubre) Los materiales compuestos: dinamismo e innovación. [Online]. <http://www.insee.fr/sessi/4pages/pdf/4p158espagnol.pdf>
- [4] Wallenberger F., *Natural fibers, plastics and composites*, Primera ed., Weston N., Ed. Massachusetts, U.S.A.: Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [5] M. Vincent and S. Álvarez, *"Principales polímeros comerciales"*. Valencia, España: UPV, 2006.
- [6] A. Miravete, *Materiales compuestos I*, Primera ed., A. Miravete, Ed. Barcelona, España: Reverté,S.A., 2007.
- [7] (2011, Septiembre) Tecnología de los Pásticos. [Online]. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/09/tabla-termoplasticos.html>
- [8] Oxford University Press. (1999, January) Polymer Data Handbook. [Online]. http://www.qmc.ufsc.br/~minatti/docs/20061/polymer_data_handbook.pdf
- [9] J. Páez, *"Obtención de compuestos de polipropileno reforzados con fibras de abacá mediante moldeo por compresión"*. Quito, Ecuador: EPN, 2007.
- [10] A. André, "Fibers for strengthening of timber structures," Lulea University of Technology, Lulea, Reporte técnico ISSN:1402-1528, 2006.
- [11] A. Hadi, "Physical properties of abaca (*musa textilis nee*) fiber reinforced high impact polystyrene (HIPS) composites," University Putra, Malaysia, ISSN:

0128-7680, 2011.

- [12] D. Leatham, "Economic factors affecting the production of abacá in Ecuador," Texas A&M University, Texas, 2000.
- [13] M. Lewin, *Handbook of fiber chemistry*, Tercera ed. Boca Raton, USA: CRC Press, Abril 2006.
- [14] K. Chawla, "*Fibrous materials*", Primera ed. New Mexico, United States: Cambridge University Press, 1998.
- [15] D. Saheb, "Natural fiber polymer composites: a review," *Polymer Engineering Group*, vol. 18, no. 4, p. 13, Mayo 1999.
- [16] Derek Hull, *An Introduction to Composite Materials*. Sevilla, España: Reverté, 2003.
- [17] B. Sigh, Gupta M., and A. Varma, *Polym. Compos.*, 1996.
- [18] F. Campbell, "*Manufacturing processes for advanced composites*". Oxford, United Kingdom: Elsevier Ltd., 2004.
- [19] S. Thomas and L. Pothan, "*Natural fiber reinforced polymer composites from macro to nanoscale*". Philadelphia, USA: Old City Publishing, Inc., 2008.
- [20] E. Fitzer, "The future of carbon-carbon composites," *Carbon*, vol. 25, no. 2, pp. 163-190, February 1987.
- [21] R. Brooks, "*Forming technology for thermoplastic composites*". Nottingham, UK: Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [22] Gabriel Rodriguez. (2009, Septiembre) Microscopia - bioservice77. [Online]. <http://bioservice77.fullblog.com.ar/ventajas-y-desventajas-entre-el-microscopio-electr.html>
- [23] A. Salas, "*Obtención de compuestos de polietileno reforzados con fibras de*

abacá mediante moldeo por compresión". Quito, Ecuador: EPN, 2009.

- [24] H. Villacís, "*Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación*". Quito, Ecuador: EPN, 2011.
- [25] D. Ponce, "*Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural*". Quito, Ecuador: EPN, 2011.
- [26] Pradeep Upadhyaya, "The effect of water absorción on mechanical properties of wood flour/wheat husk polypropylene hybrid composites," *SCIENTIFIC RESEARCH*, no. 317-325, p. 10, Marzo 2012.
- [27] S. Jeyanthi, "Improving mechanical properties by hybrid long fiber reinforced composite for front beam of automotive," *European Journal of Scientific Research*, vol. 60, no. 2, pp. 195-199, 2011.
- [28] S. Jayabal, "Effect of glass hybridization and staking sequence on mechanical behaviour of interply coir–glass hybrid laminate," *Bull. Mater. Sci*, vol. 34, no. 2, pp. 293-298, Abril 2011.
- [29] A. Kalan, "The effects of opfb size on the mechanical properties of oil palm fruit bunch fibre filled polypropylene clay nanocomposites," *International Journal of Nanoscience*, vol. 9, no. 6, pp. 563-566, 2010.
- [30] M. Masudul Hassan, "Study on the performance of hybrid jute/betel nut fiber reinforced polypropylene composites," *Journal of Adhesion Science and Technology*, no. 25, pp. 615-626, 2011.
- [31] S. Sudhir Kumar, "Thermomechanical properties of jute/bagasse hybrid fibre reinforced epoxy thermoset composites," *BioResources*, vol. 4, no. 4, pp. 1455-1476, 2009.
- [32] A. Athijayamani, "Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite," *Materials*

Science and Engineering A, no. 517, pp. 344-353, Abril 2009.

- [33] A. Mohanty, S. Joshi, and Arora S., "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," Michigan State University, Michigan, Paper 2003.
- [34] K. Friedrich, S. Fakirov, and Z. Zhang, "*Polymer composites from nano-to macro-scale*". New York, USA: Springer, 2005.
- [35] S. Mazumdar, "*Composites manufacturing: materials, product, and engineering*". Boca Raton: CRC Press LLC, 2002.
- [36] W. Callister, "*Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*", Segunda ed. Barcelona, España: Reverté, 2007.
- [37] Salvador Ortolá. (2009, Agosto) Blog Ingeniería de Materiales. [Online]. <http://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/08/23/materiales-compuestos-de-matriz-termoplastica-aplicaciones-aeronauticas-i/>
- [38] Painter P. and Coleman M., *Essentials of polymer science and engineering*, Primera ed. Pennsylvania, U.S.A.: DEStech Publications, 2009.
- [39] J. Dávila et al., "*Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*", Primera ed., Víctor H. Guerrero, Ed. Quito, Ecuador: Imprefepp, 2011.

ANEXOS

- ANEXO 1. FICHA TÉCNICA DEL POLIPROPILENO**
- ANEXO 2. PLANOS DEL MOLDE PARA LA ELABORACIÓN DE LÁMINAS**
- ANEXO 3. PLANOS DEL MOLDE DE TERMOFORMADO PARA EL PROTOTIPO**
- ANEXO 4. CÁLCULOS DE MASA DE FIBRA DE VIDRIO, ABACÁ Y PP PARA FORMAR LOS COMPUESTOS**
- ANEXO 5. CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN**
- ANEXO 6. CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN**
- ANEXO 7. CÁLCULO DE DENSIDAD REAL DEL COMPUESTO HÍBRIDO**
- ANEXO 8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**
- ANEXO 9. MICROGRAFÍA DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO**

ANEXO 1. FICHA TÉCNICA DEL POLIPROPILENO



PH 1310

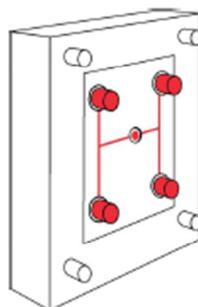
www.petroquim.cl

POLIPROPILENO HOMOPOLIMERO

Indicado para moldeo por inyección. De fácil procesabilidad, posee una adecuada estabilidad durante el proceso, buena rigidez y balance de propiedades mecánicas. Recomendado para piezas de uso general con mediano espesor de pared.

APLICACIONES

INYECCION



Artículos domésticos, utensilios de cocina
Potes y bandejas para alimentos
Tapas y juguetes

RECOMENDACIONES DE PROCESAMIENTO

INYECCION

Alimentación	180 °C
Tornillo	190 a 220 °C
Molde	20 a 60 °C

PROPIEDADES	ENSAYOS ASTM	UNIDADES	VALOR
Índice de Fluidez 2,16 kg/230 °C	D-1238/95	g/10 min	13
Temperatura de Ablandamiento VICAT (1 kg)	D-1525/97	°C	154
Temperatura de Deformación Térmica – HDT (455 kPa)	D-648/97	°C	95
Resistencia al Impacto IZOD a 23 °C	D-256/93	J/m	34
Resistencia a la Tracción (en el punto de fluencia)	D-638/97	MPa	34
Elongación (en el punto de fluencia)	D-638/97	%	12
Módulo de Elasticidad en Flexión	D-790/97	MPa	1.500

La Densidad de todos los grados de polipropileno producidos por Petroquim S.A. se encuentran en el rango de 0,905 +/- 0,005 g/cc

ANEXO 2. PLANOS DEL MOLDE PARA LA ELABORACIÓN DE LÁMINAS

**ANEXO 3. PLANOS DEL MOLDE DE TERMOFORMADO PARA EL
PROTOTIPO**

ANEXO 4. CÁLCULOS DE MASADE FIBRA DE VIDRIO, ABACÁ Y PP PARA FORMAR LOS COMPUESTOS

Para calcular las cantidades de gramos de fibra de vidrio, abacá y polipropileno requeridas para la elaboración de las 27 configuraciones de los compuestos híbridos en estudio, se tomó en cuenta las densidades teóricas de los materiales antes mencionados, las dimensiones del molde y sus fracciones volumétricas.

Los datos de densidades de la fibra de vidrio, el abacá y la matriz de polipropileno obtenidos de referencias bibliográficas son los siguientes:

$$\delta_{\text{vidrio}} = 2,55 \text{ (g/cm}^3\text{)}^{18}$$

$$\delta_{\text{abacá}} = 1.3 \text{ (g/cm}^3\text{)}^{19}$$

$$\delta_{\text{matriz}} = 0.905 \text{ (g/cm}^3\text{)}^{20}$$

Para determinar el valor de la fracción volumétrica de la matriz se utilizó la Ecuación 5. Para esto primero se calculó la fracción volumétrica de la fibra con la Ecuación 6.

$$v_{\text{vidrio}} + v_{\text{abacá}} = v_f \quad 5$$

$$v_{\text{matriz}} = 1 - v_f \quad 6$$

Luego de obtener los valores de v_{matriz} para cada configuración, se procedió a determinar la densidad del compuesto y se utilizó la Ecuación 7:

$$\delta_c = (\delta_{\text{vidrio}} * v_{\text{vidrio}}) + (\delta_{\text{abacá}} * v_{\text{abacá}}) + (\delta_{\text{matriz}} * v_{\text{matriz}}) \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad 7$$

Luego se determinó el volumen del compuesto con la Ecuación 8, dependiendo del molde y el espesor de las láminas del compuesto híbrido.

$$V_c = A_{\text{lam}} * e \quad 8$$

¹⁸

¹⁹ Pontón, P.; Estudio del efecto de encolado de fibra de abacá en el mejoramiento de su capacidad de tisaje. EPN; Quito, 2009.

²⁰ Hoja técnica PP PH1310 marca Petroquim.

Con los datos anteriormente mencionados, se determinaron las fracciones de masa del refuerzo y de matriz y se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$x_{\text{vidrio}} = (v_{\text{vidrio}} * \delta_{\text{vidrio}}) / \delta_c \quad 9$$

$$x_{\text{abacá}} = (v_{\text{abacá}} * \delta_{\text{abacá}}) / \delta_c \quad 10$$

$$x_{\text{matriz}} = 1 - x_{\text{abacá}} - x_{\text{vidrio}} \quad 11$$

Para determinar la masa del compuesto se utilizó la siguiente ecuación:

$$m_c = V_c * \delta_c \quad 12$$

Con la obtención de la m_c y con las x_{vidrio} , $x_{\text{abacá}}$, x_{matriz} , se determinó la masa de la fibra de vidrio, abacá, y de la matriz respectivamente con las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$m_{\text{vidrio}} = x_{\text{vidrio}} * m_c \quad 13$$

$$m_{\text{abacá}} = x_{\text{abacá}} * m_c \quad 14$$

$$m_{\text{matriz}} = x_{\text{matriz}} * m_c \quad 15$$

ANEXO 5. CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN

Una vez obtenida las cargas y deformaciones de los ensayos de tracción realizados a las probetas de cada configuración se determinaron las siguientes propiedades:

- **Resistencia máxima a la tracción**

La resistencia última a la tracción se determinó con la Ecuación 16:

$$\sigma_u = \frac{F_{max.}}{A} \quad 16$$

Donde σ_u : esfuerzo último a la tracción (Mpa), $F_{max.}$: fuerza máxima antes de la ruptura(N) y A: área promedio de la sección transversal de la probeta (mm^2).

- **Modulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad a flexión se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad 17$$

Donde E : Modulo de elasticidad (Mpa), $\Delta\sigma$: variación del esfuerzo aplicado(Mpa), $\Delta\epsilon$: variación de la deformación unitaria(mm).

- **Deformación unitaria**

La deformación unitaria de las probetas fue calculada de acuerdo a la ecuación mostrada a continuación:

$$\epsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad 18$$

Donde ϵ_i : deformación unitaria en el punto i (mm), δ_i : desplazamiento del extensómetro en el punto i (mm), L_g : apertura inicial del extensómetro, 50 mm.

ANEXO 6. CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN

Para los ensayos de flexión según la norma ASTM D 7264/D 7264M-07 se utilizó la prueba tipo A, donde se considera la flexión en dos apoyos simples. Luego de ensayar las probetas y registrar los datos de deformación y carga se calcularon las siguientes propiedades.

- **Resistencia máxima a la flexión**

La resistencia máxima a la flexión se calculó de acuerdo a la Ecuación 19.

$$\sigma = \frac{3PL^3}{2bh^2} \quad 19$$

Donde σ : resistencia máxima a la flexión (Mpa), P : fuerza máxima aplicada(N), L : longitud entre apoyos(mm), b : ancho de la probeta (mm), h : espesor de la probeta(mm).

- **Deformación unitaria**

La deformación unitaria de las probetas fue calculada de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad 20$$

Donde ϵ : deformación unitaria máxima (mm/mm), δ : deflexión en la probeta(mm).

- **Módulo de elasticidad a flexión**

El modulo de elasticidad a flexión se calculó de acuerdo a la ecuación que se presenta a continuación:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad 21$$

Donde E : modulo de elasticidad a la flexión (MPa), $\Delta\sigma$: diferencia del esfuerzo de flexión entre dos puntos seleccionados (MPa), $\Delta\epsilon$: diferencia en la deformación entre dos puntos seleccionados (mm).

ANEXO 7. CÁLCULO DE DENSIDAD REAL DEL COMPUESTO HÍBRIDO

La densidad real del material compuesto híbrido se determinó a partir de las laminas de flexión, las mismas que presentan dimensiones de espesor que facilitan una mejor apreciación en la toma de datos. Los datos obtenidos para la determinación de la densidad real del material compuesto híbrido fueron: el peso y las dimensiones del largo, ancho y espesor de las láminas de compuesto.

La ecuación utilizada para la obtención de la densidad real es:

$$\delta_{C_{real}} = \frac{m_{comp}}{V} \quad 22$$

Donde:

$\delta_{C_{real}}$ = Densidad del compuesto Real

m_{comp} = Peso del compuesto

V = Volumen de la lámina

La ecuación que sirve para calcular la densidad teórica es:

$$\delta_c = (\delta_{vidrio} * v_{vidrio}) + (\delta_{abacá} * v_{abacá}) + (\delta_{matriz} * v_{matriz}) \quad (g/cm^3) \quad 23$$

Donde:

$\delta_{C_{teórico}}$ = Densidad del compuesto teórico

$\delta_{abacá}$ = Densidad de la fibra de abacá

δ_{vidrio} = Densidad de la fibra de vidrio

$\delta_{matriz PP}$ = Densidad de la matriz de Polipropileno

$v_{f_{abacá}}$ = Fracción volumétrica de la fibra de abacá

$v_{f_{vidrio}}$ = Fracción volumétrica de la fibra de vidrio

$v_{matriz PP}$ = Fracción volumétrica de la matriz de polipropileno

ANEXO 8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los ensayos de tracción, flexión e impacto realizados a las probetas de material compuesto híbrido generaron una base de datos de las propiedades mecánicas de las veintisiete distintas configuraciones en estudio. Éstos datos fueron organizados en hojas de cálculo y comparados a través del software estadístico Statgraphics versión Centurion XV y se encuentran en el disco óptico adjunto al proyecto de titulación. Además, se requirió definir el nivel de confianza a considerar en los análisis, el mismo que fue del 95%, debido a los defectos en la uniformidad de distribución de las fibras en el material compuesto híbrido. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo de las diez configuraciones más representativas junto a la descripción del proceso seguido para su análisis.

A continuación, se indica la nomenclatura empleada para identificar las veintisiete configuraciones del material en estudio como lo indica la Tabla A1. Por ejemplo, el código FC201002 corresponde a la configuración 3 e indica que se trata de un material compuesto híbrido de matriz polipropileno al 20 vol% refuerzo de los cuales, el 25% es fibra corta de abacá de 10 mm y el 75% es fibra de vidrio en forma de mat.

Tabla A1. Nomenclatura designada para identificar las diferentes configuraciones.

No	Grupo	Código	Fibra de abacá tipo	Vol% del refuerzo [%]	Fibra de vidrio [%]	Fibra de abacá [%]	Polipropileno [%]
1		Matriz	-	-	0	0	100
2		FV20	-	20	100	0	80
3	1	FC201002	Fibra corta 10 mm	20	75	25	80
4		FC201003	Fibra corta 10 mm	20	50	50	80
5		FC201004	Fibra corta 10 mm	20	25	75	80
6		FC201005	Fibra corta 10 mm	20	0	100	80
7	2	FC202002	Fibra corta 20 mm	20	75	25	80
8		FC202003	Fibra corta 20 mm	20	50	50	80
9		FC202004	Fibra corta 20 mm	20	25	75	80
10		FC202005	Fibra corta 20 mm	20	0	100	80

Continuación de la Tabla A1.

No	Grupo	Código	Fibra de abacá tipo	Vol% del refuerzo [%]	Fibra de vidrio [%]	Fibra de abacá [%]	Polipropileno [%]
11	3	FL2002	Fibra continua 250 mm	20	75	25	80
12		FL2003	Fibra continua 250 mm	20	50	50	80
13		FL2004	Fibra continua 250 mm	20	25	75	80
14		FL2005	Fibra continua 250 mm	20	0	100	80
15		FV25	-	25	100	0	75
16	4	FC251002	Fibra corta 10 mm	25	75	25	75
17		FC251003	Fibra corta 10 mm	25	50	50	75
18		FC251004	Fibra corta 10 mm	25	25	75	75
19		FC251005	Fibra corta 10 mm	25	0	100	75
20	5	FC252002	Fibra corta 20 mm	25	75	25	75
21		FC252003	Fibra corta 20 mm	25	50	50	75
22		FC252004	Fibra corta 20 mm	25	25	75	75
23		FC252005	Fibra corta 20 mm	25	0	100	75
24	6	FL2502	Fibra continua 250 mm	25	75	25	75
25		FL2503	Fibra continua 250 mm	25	50	50	75
26		FL2504	Fibra continua 250 mm	25	25	75	75
27		FL2505	Fibra continua 250 mm	25	0	100	75

Seguidamente, se presentan las gráficas de medias y las tablas de pruebas de múltiples rangos para los distintos grupos de comparación de los diferentes ensayos realizados en el estudio.

ENSAYO DE TRACCIÓN

De cada grupo de comparación se extrajo una configuración que presenta la mayor media de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, módulo de trabajo y elongación. Por medio del programa Statgraphics se obtuvieron tablas de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si dos o más valores fueron estadísticamente iguales se seleccionó aquél que tuvo un refuerzo híbrido con el menor porcentaje de fibra de vidrio. De esta forma, se aseguró que el nuevo material presente excelentes propiedades mecánicas y que sea más amigable con el medio ambiente.

Esfuerzo máximo

El primer grupo de comparación está formado por las siguientes configuraciones: FC201002, FC201003, FC201004 y FC201005, es decir, las de fibra corta de 10 mm al 20 vol% refuerzo. En este grupo el factor que varió es el porcentaje de refuerzo híbrido como sigue (% fibra vidrio / % fibra abacá): 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100 respectivamente. El gráfico de medias generado por el programa Statgraphics mediante el análisis Anova para este grupo se presenta en la Figura A1.

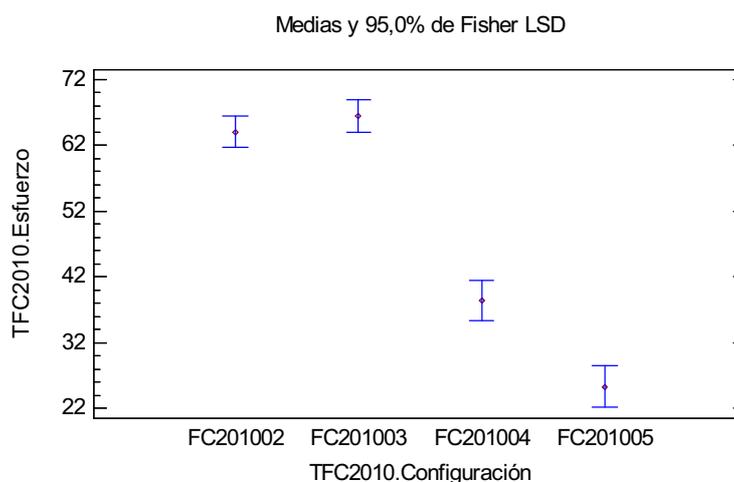


Figura A1. Esfuerzo máximo de materiales compuestos híbridos de fibra corta de abacá de 10 mm al 20 vol% refuerzo.

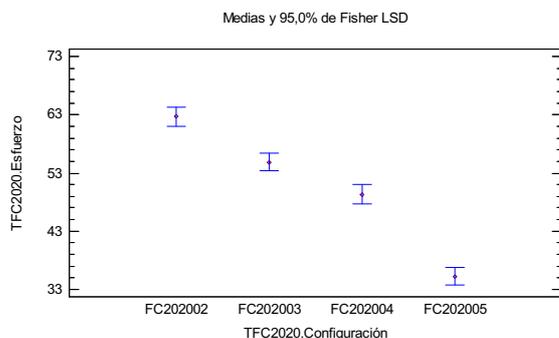
Tabla A2. Prueba de múltiples rangos para determinar grupos homogéneos.

Método: 95,0 porcentaje LSD

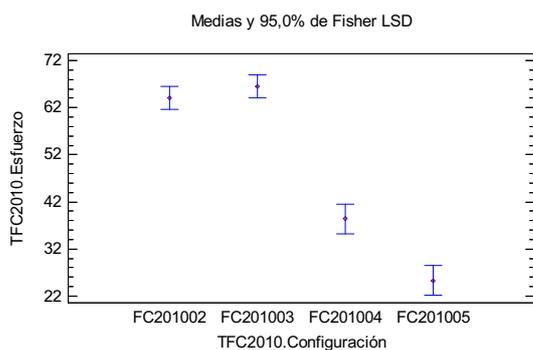
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC201005	25,31	X
FC201004	38,42	X
FC201002	64,06	X
FC201003	66,50	X

En la Tabla A2, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

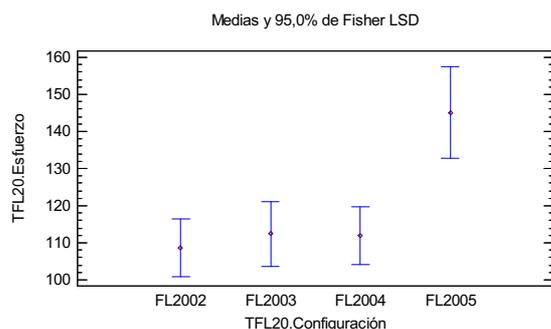
De aquí en adelante se detallan las tablas de resultados finales de la comparación de los demás grupos. Lo mencionado anteriormente constituye un ejemplo de cómo se analizó entre sus diferentes porcentajes de configuración. Cabe resaltar, que se presentan sólo los diagramas de medias y la tabla de prueba de múltiples rangos para determinar grupos homogéneos, y se ha resaltado el material que presentó las mejores propiedades mecánicas.



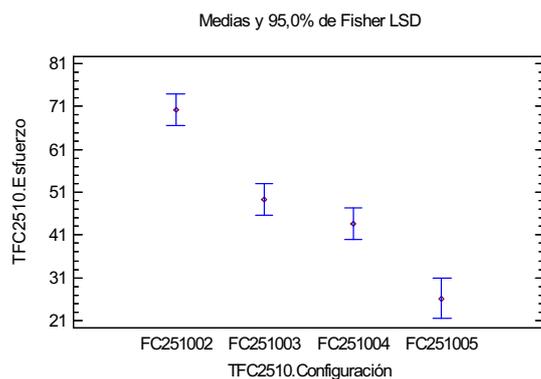
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC202005	35,27	X
FC202004	49,35	X
FC202003	54,83	X
FC202002	62,66	X



Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC201005	25,31	X
FC201004	38,42	X
FC201002	64,06	X
FC201003	66,50	X

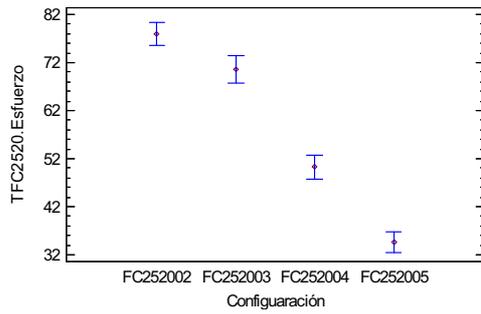


Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FL2002	108,57	X
FL2004	112,01	X
FL2003	112,40	X
FL2005	145,10	X



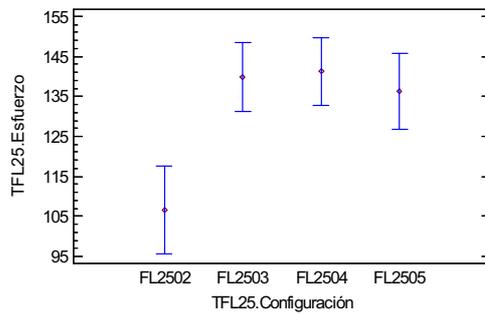
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC251005	26,19	X
FC251004	43,54	X
FC251003	49,40	X
FC251002	70,21	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



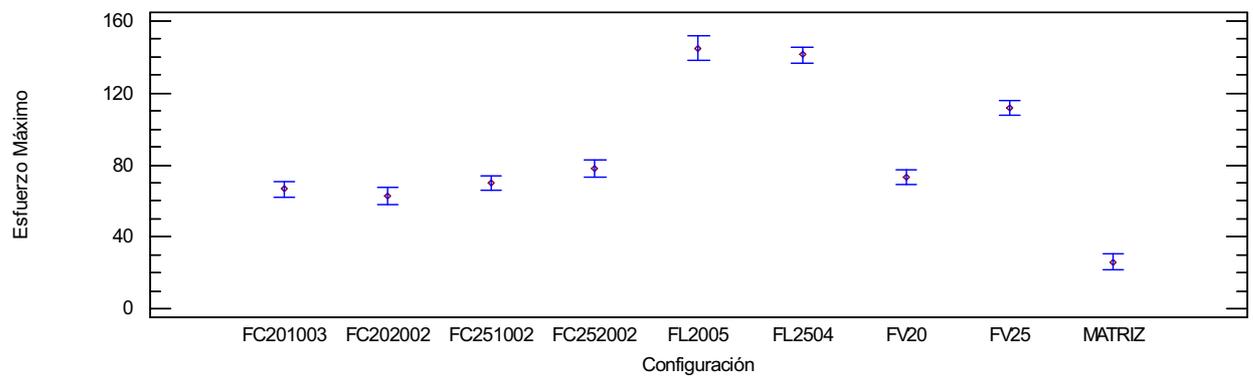
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC252005	34,58	X
FC252004	50,28	X
FC252003	70,56	X
FC252002	77,98	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



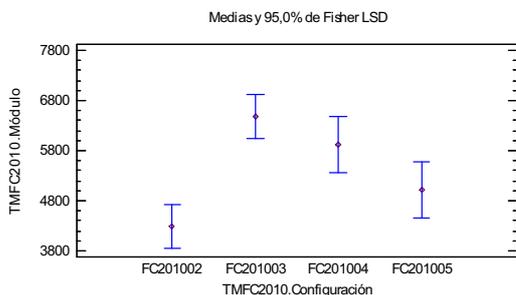
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FL2502	106,62	X
FL2505	136,30	X
FL2503	139,82	X
FL2504	141,20	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

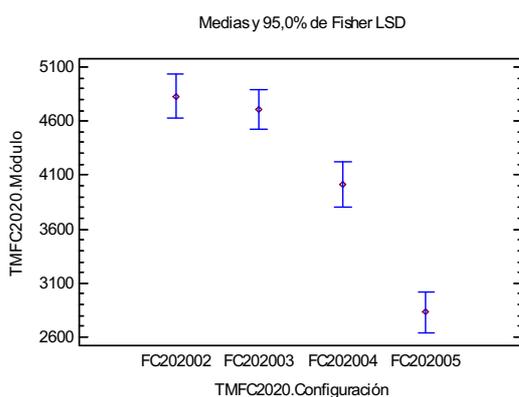


Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
Matriz	26,12	X
FC202002	62,66	X
FC201003	66,43	X
FC251002	70,21	XXX
FV20	72,90	XX
FC252002	77,98	X
FV25	111,52	X
FL2504	141,20	X
FL2005	145,10	X

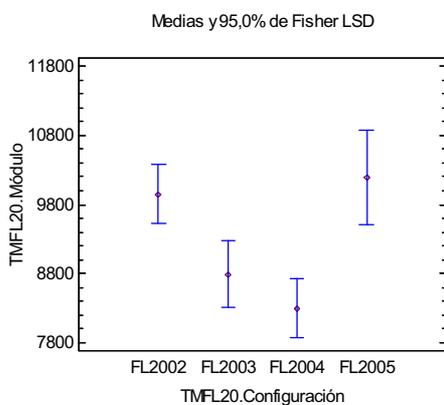
Módulo de elasticidad



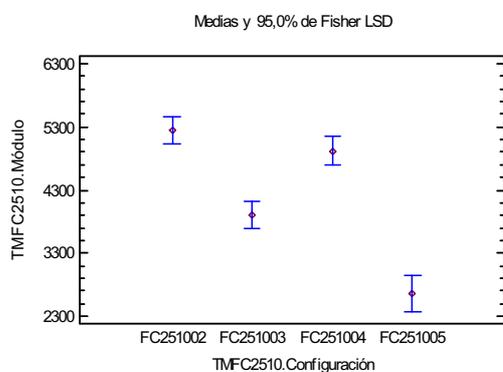
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC201002	4288,26	X
FC201005	5015,17	XX
FC201004	5924,80	XX
FC201003	6473,00	X



Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC202005	2829,76	X
FC202004	4010,82	X
FC202003	4704,40	X
FC202002	4830,40	X

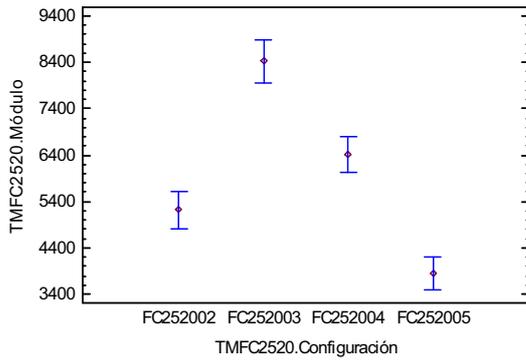


Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FL2004	8299,40	X
FL2003	8790,40	X
FL2002	9949,46	X
FL2005	10183,70	X



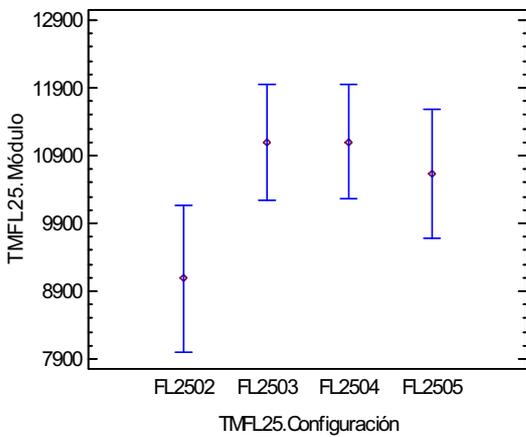
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC251005	2654,13	X
FC251003	3902,96	X
FC251004	4922,54	X
FC251002	5249,26	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



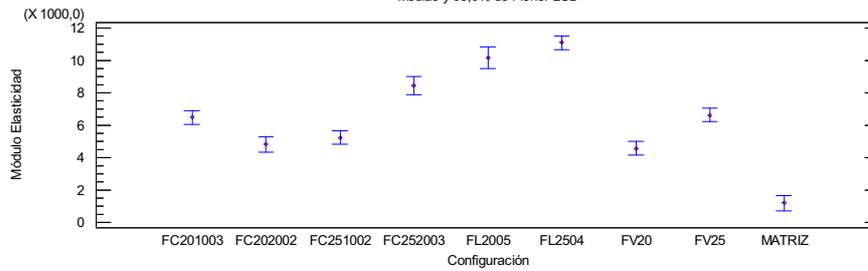
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC252005	3854,46	X
FC252002	5224,35	X
FC252004	6416,65	X
FC252003	8429,43	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FL2502	9085,00	X
FL2505	10635,40	XX
FL2503	11096,30	X
FL2504	11101,00	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

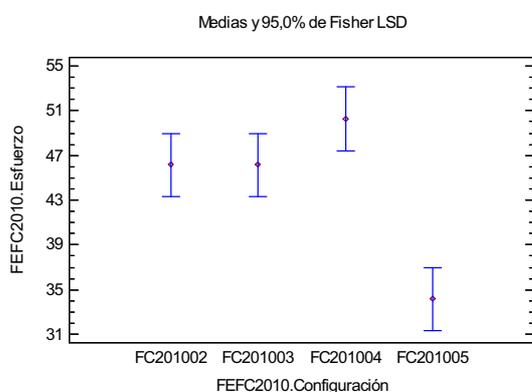


Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
Matriz	1194,77	X
FV20	4571,16	X
FC202002	4830,40	X
FC251002	5249,26	X
FC201003	6473,00	X
FV25	6622,18	X
FC252003	8429,43	X
FL2005	10183,70	X
FL2504	11101,00	X

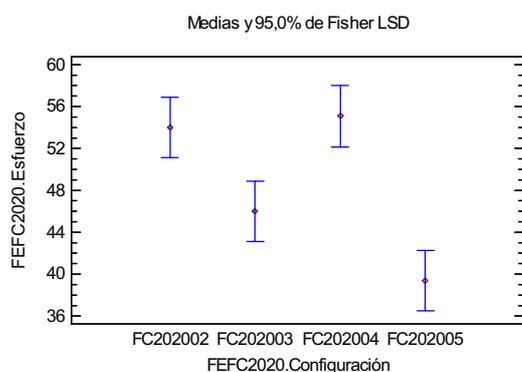
ENSAYO DE FLEXIÓN

De cada grupo de comparación se extrajo una configuración que presenta la mayor media de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, módulo de trabajo y elongación a esfuerzos de flexión. Por medio del Statgraphics se obtuvieron tablas de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si dos o más valores fueron estadísticamente iguales se seleccionó aquél que tuvo refuerzo híbrido con el menor porcentaje de fibra de vidrio. De esta forma, se aseguró que el nuevo material presente excelentes propiedades mecánicas y que sea más amigable con el medio ambiente.

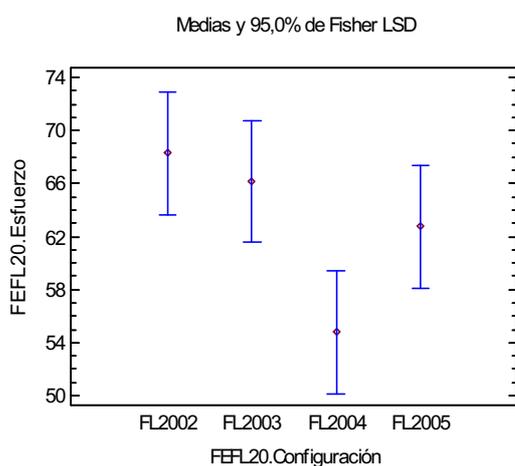
Esfuerzo máximo



Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC201005	34,17	X
FC201002	46,14	X
FC201003	46,14	X
FC201004	50,28	X

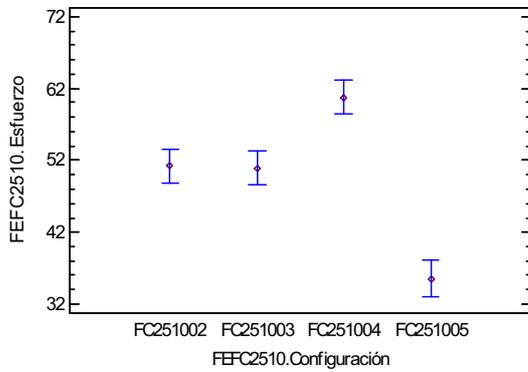


Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC202005	39,35	X
FC202003	45,97	X
FC202002	53,99	X
FC202004	55,08	X



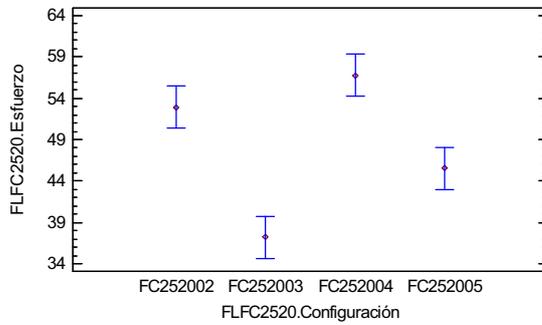
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FL2004	54,77	X
FL2005	62,77	XX
FL2003	66,16	X
FL2002	68,31	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



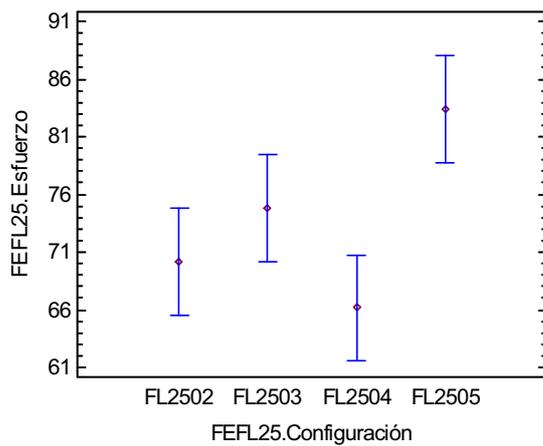
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC251005	35,57	X
FC251003	50,92	X
FC251002	51,23	X
FC251004	60,78	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

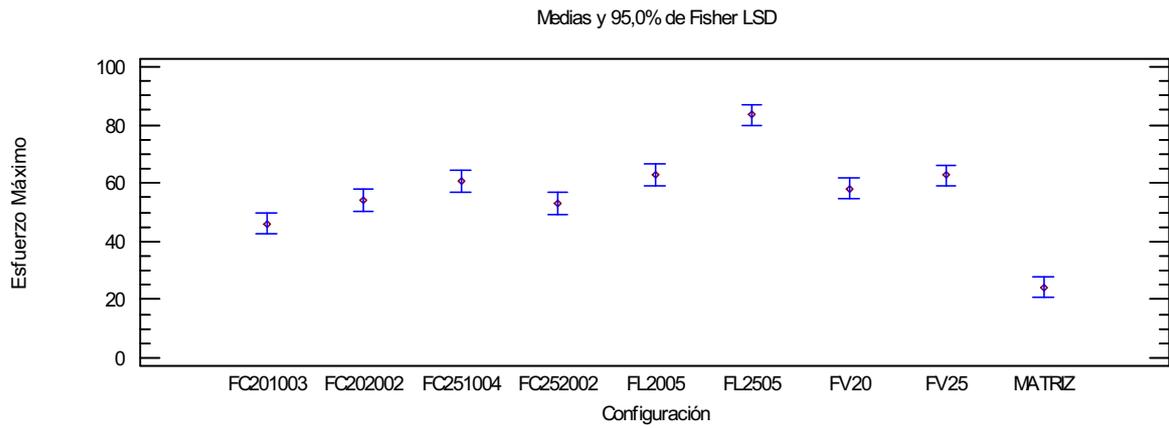


Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FC252003	37,23	X
FC252005	45,55	X
FC252002	52,92	X
FC252004	56,77	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

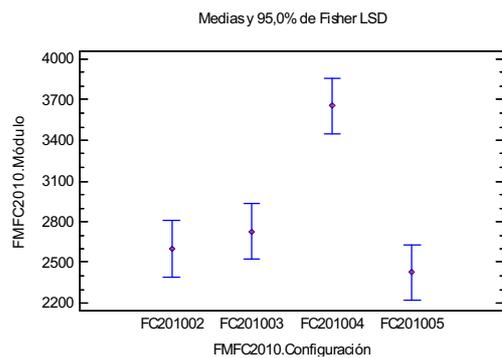


Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
FL2504	66,15	X
FL2502	70,19	X
FL2503	74,78	XX
FL2505	83,38	X



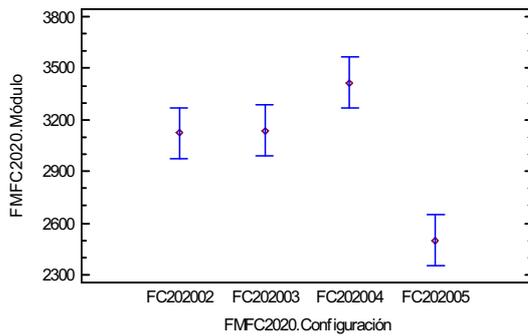
Configuración	Esfuerzo máx. (MPa)	Grupos homogéneos
Matriz	24,31	X
FC201003	46,14	X
FC252002	52,92	XX
FC202002	53,99	XX
FV20	58,15	XXX
FC251004	60,78	XX
FV25	62,62	X
FL2005	62,77	X
FL2505	83,38	X

Módulo de elasticidad



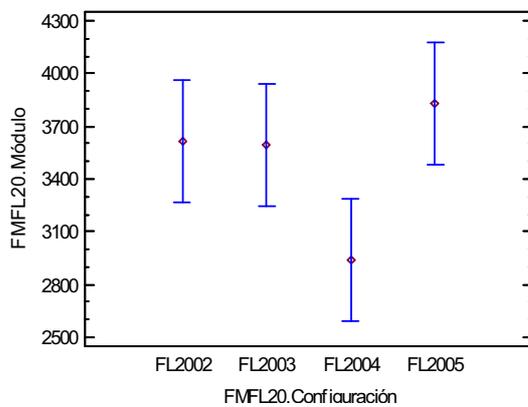
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC201005	2424,50	X
FC201002	2600,60	X
FC201003	2726,46	X
FC201004	3655,42	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



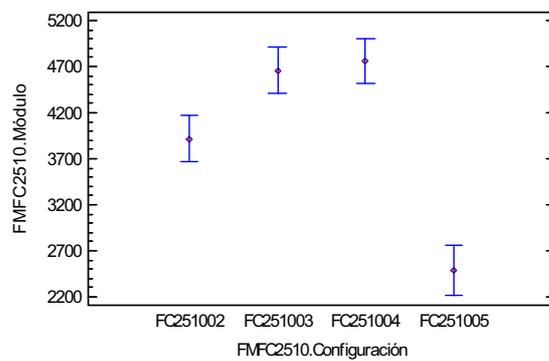
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC202005	2501,98	X
FC202002	3123,98	X
FC202003	3138,52	X
FC202004	3416,60	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



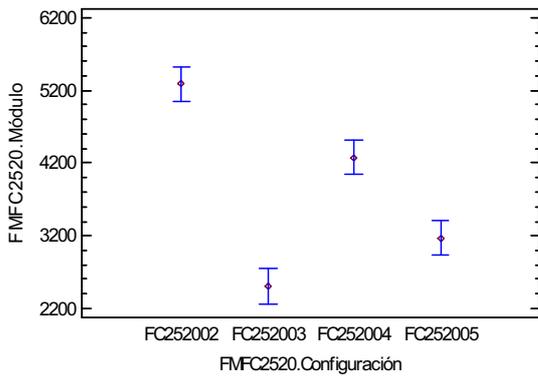
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FL2004	2935,20	X
FL2003	3590,68	XX
FL2002	3614,88	XX
FL2005	3827,00	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



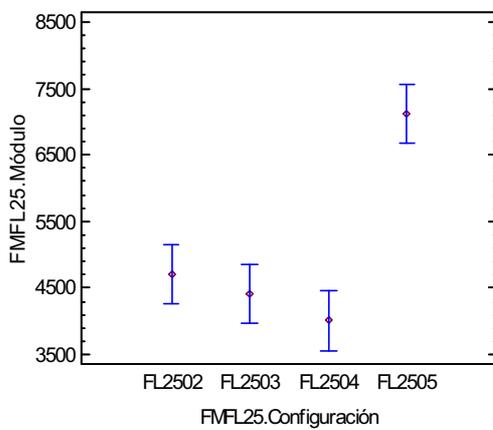
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC251005	2485,65	X
FC251002	3918,18	X
FC251003	4660,08	X
FC251004	4763,48	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



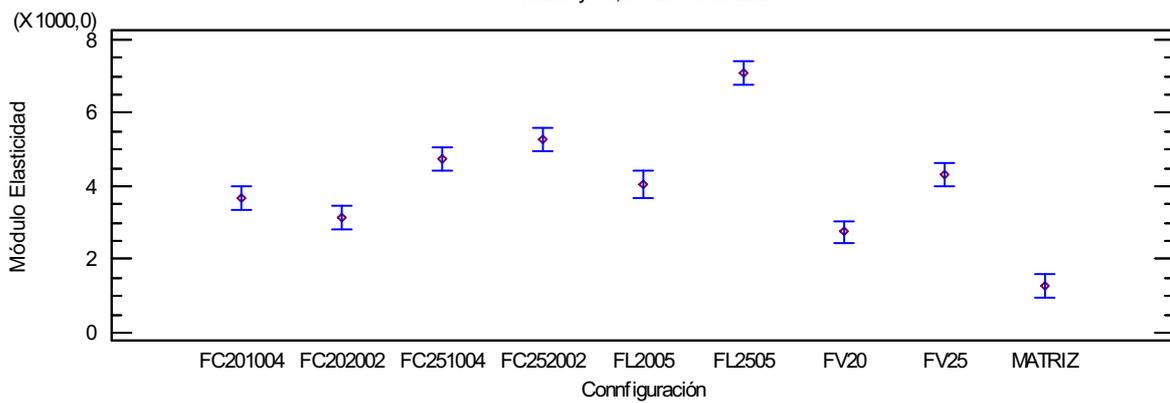
Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FC252003	2508,32	X
FC252005	3165,60	X
FC252004	4272,92	X
FC252002	5288,40	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
FL2504	4005,06	X
FL2503	4415,18	X
FL2502	4712,20	X
FL2505	7118,00	X

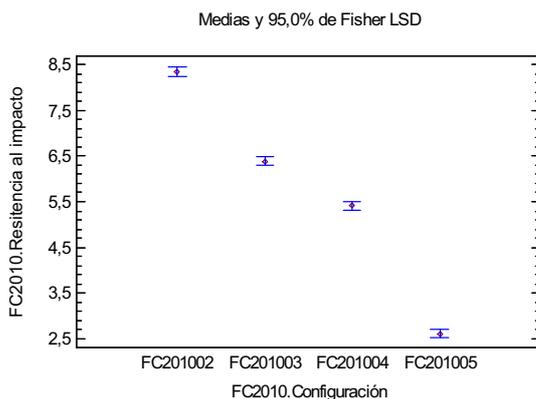
Medias y 95,0% de Fisher LSD



Configuración	Módulo de elasticidad (MPa)	Grupos homogéneos
Matriz	1267,28	X
FV20	2747,2	X
FC202002	3123,98	XX
FC201004	3655,42	XX
FL2005	4050,3	XX
FV25	4335,36	XX
FC251004	4763,48	XX
FC252002	5288,4	X
FL2505	7118,0	X

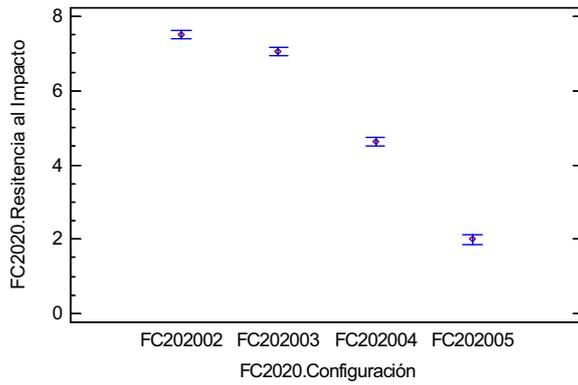
ENSAYO DE IMPACTO

De cada grupo de comparación se extrajo una configuración que presentó la mayor media de esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, módulo de trabajo y elongación a esfuerzos de flexión. Por medio del programa Statgraphics se obtuvieron tablas de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si dos o más valores fueron estadísticamente iguales se seleccionó aquél que tuvo refuerzo híbrido con el menor porcentaje de fibra de vidrio. De esta forma, se aseguró que el nuevo material presente excelentes propiedades mecánicas y que sea más amigable con el medio ambiente.



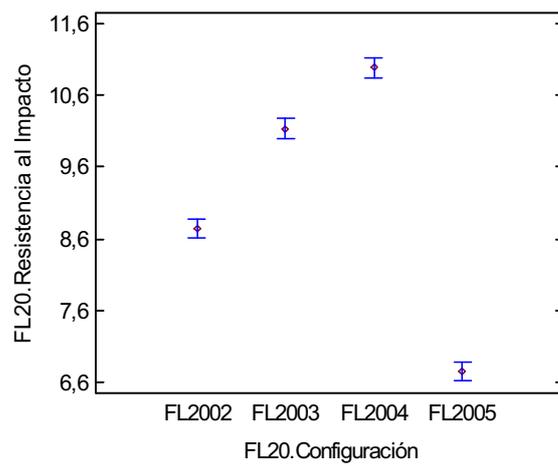
Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
FC201005	2,61	X
FC201004	5,41	X
FC201003	6,39	X
FC201002	8,35	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



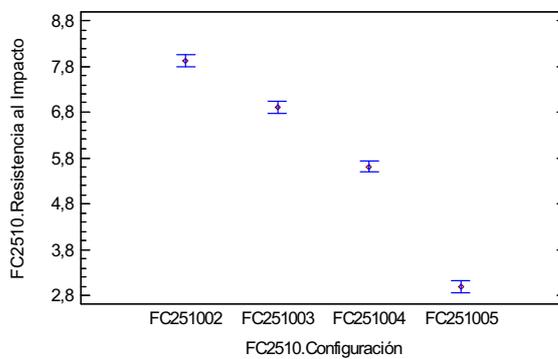
Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
FC202005	2,00194	X
FC202004	4,62582	X
FC202003	7,04622	X
FC202002	7,51214	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

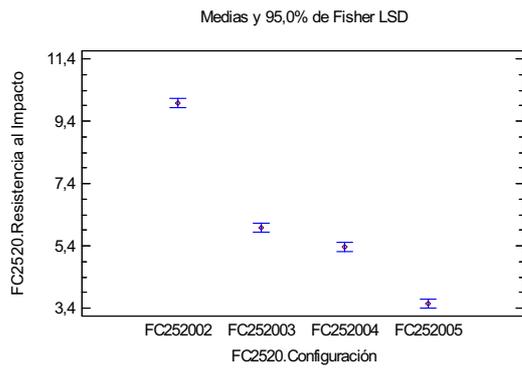


Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
FL2005	6,75	X
FL2002	8,74	X
FL2003	10,13	X
FL2004	10,99	X

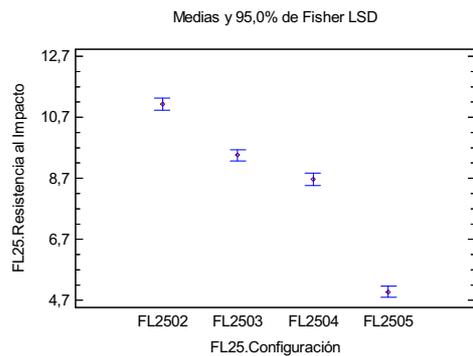
Medias y 95,0% de Fisher LSD



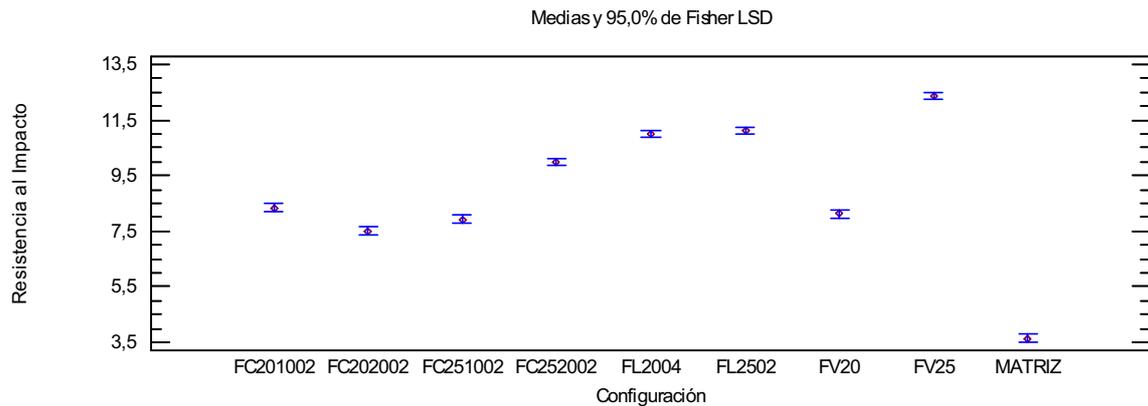
Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
FC251005	2,98	X
FC251004	5,61	X
FC251003	6,91	X
FC251002	7,92	X



Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
FC252005	3,54	X
FC252004	5,35	X
FC252003	5,98	X
FC252002	9,99	X



Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
FL2505	4,98	X
FL2504	8,67	X
FL2503	9,45	X
FL2502	11,13	X



Configuración	Energía absorbida (J)	Grupos homogéneos
Matriz	3,63	X
FC202002	7,51	X
FC251002	7,92	X
FV20	8,12	XX
FC201002	8,35	X
FC252002	9,99	X
FL2004	10,99	X
FL2502	11,13	X
FV25	12,37	X

ANEXO 9. MICROGRAFÍA DEL MATERIAL COMPUESTO HÍBRIDO

Se presentan a continuación las micrografías de las mejores configuraciones, obtenidas en un microscopio electrónico de barrido:

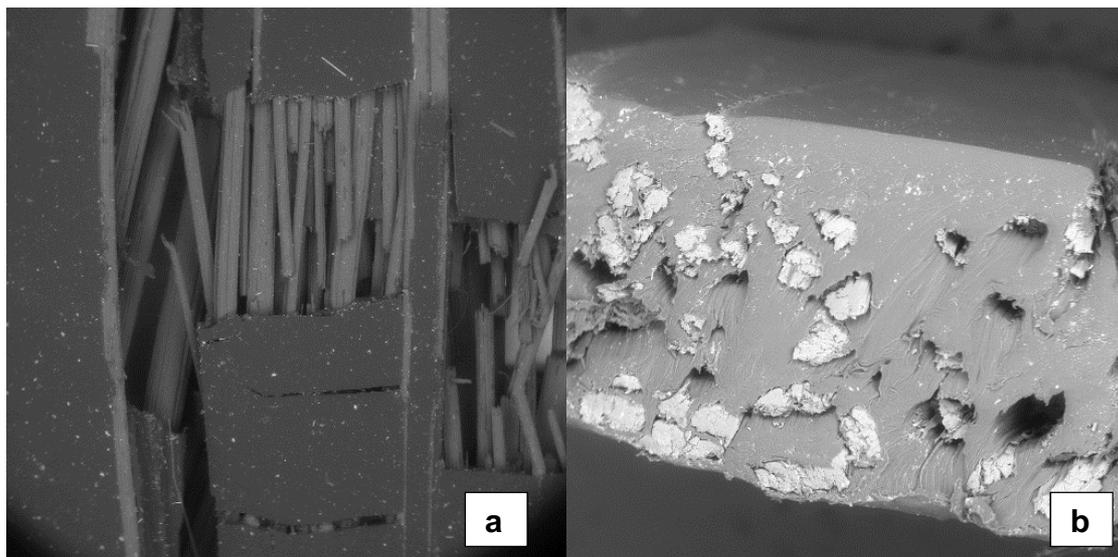


Figura 9.1. Material compuesto FL2505: (a) zona de rotura; (b) sección transversal.

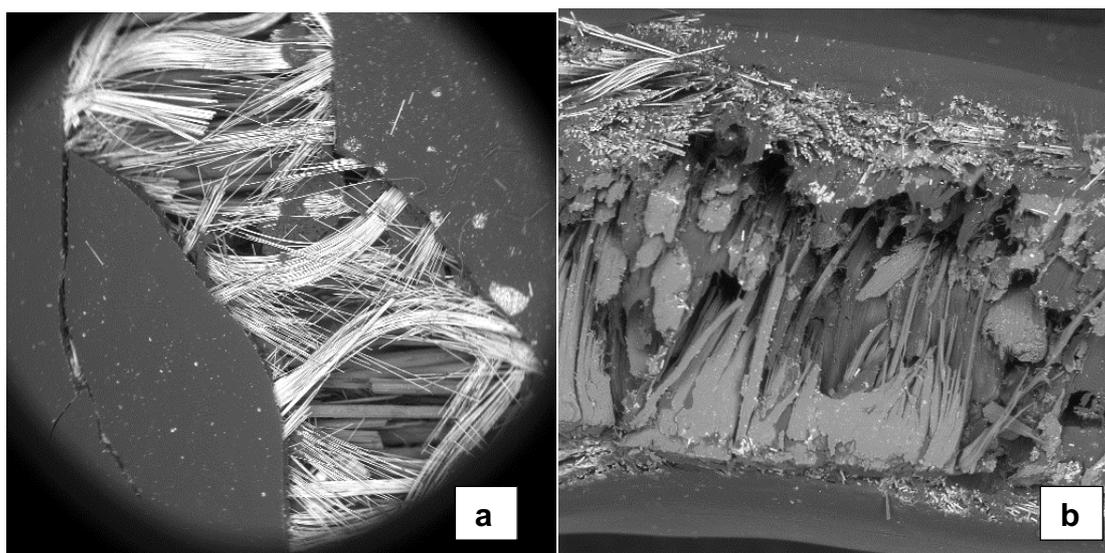


Figura 9.2. Material compuesto híbrido FL2504: (a) zona de rotura; (b) sección transversal.

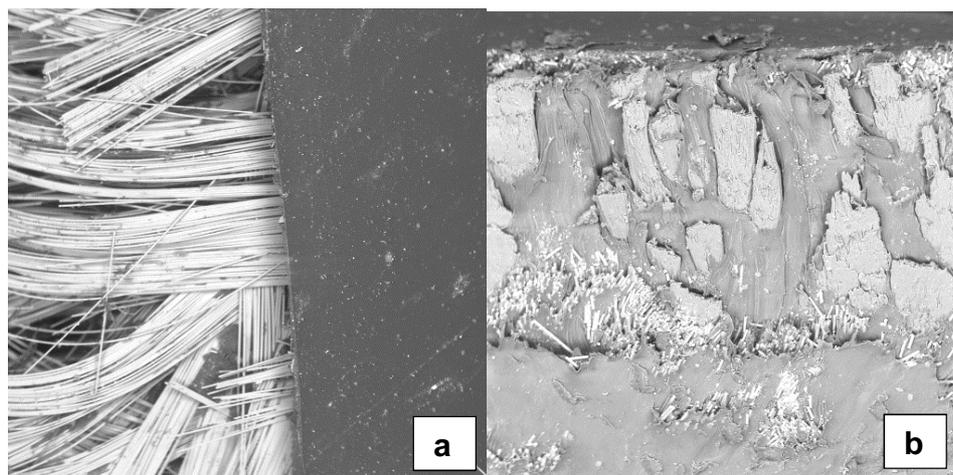


Figura 9.3. Material compuesto híbrido FL2503: (a) zona de rotura; (b) sección transversal.

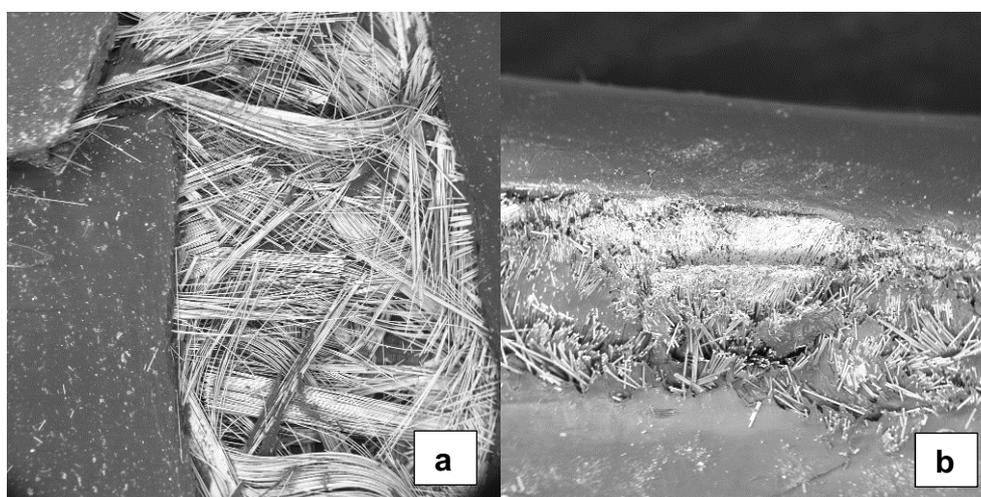


Figura 9.4. Material compuesto FV20: (a) zona de rotura; (b) sección transversal.

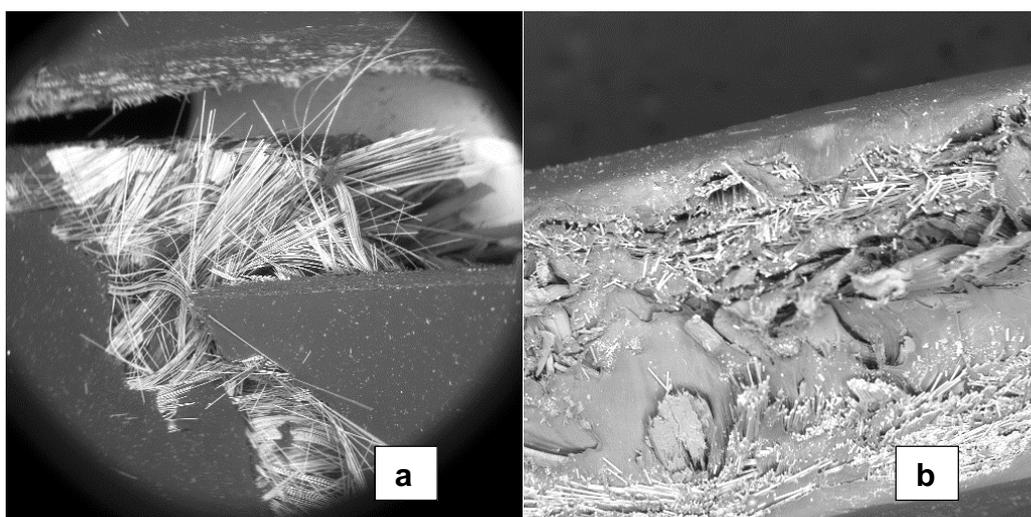


Figura 9.5. Material compuesto híbrido FC252003: (a) zona de rotura; (b) sección transversal.

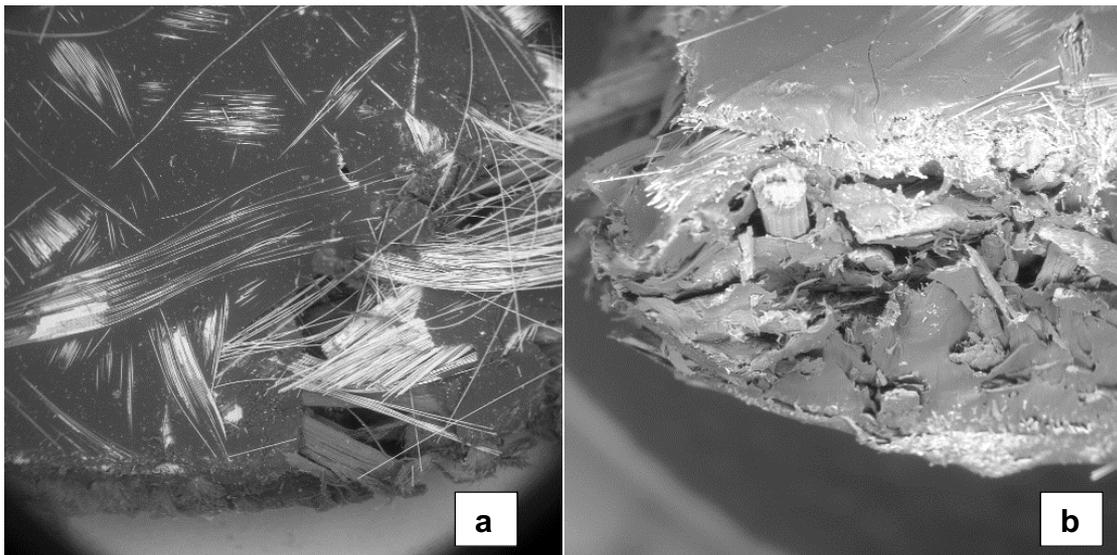


Figura 9.6. Material compuesto híbrido FC251004: (a) zona de rotura; (b) sección transversal.

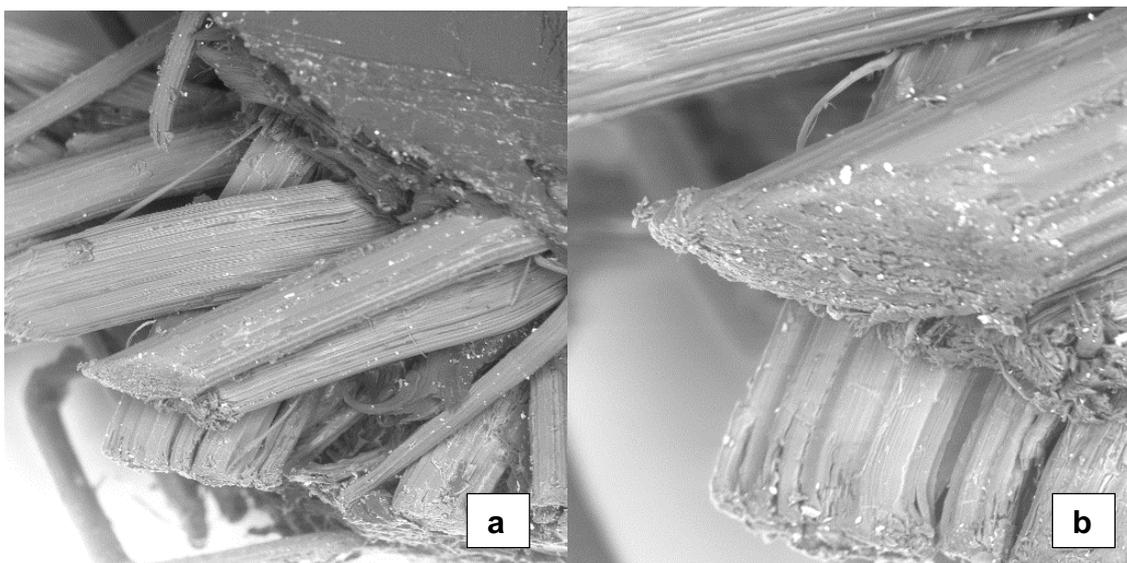


Figura 9.7. Interfaz fibra-matriz.