

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA BIODEGRADABLE REFORZADA CON FIBRA NATURAL**

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

**DIEGO SEBASTIÁN PONCE CAHUASQUÍ**

[s\\_ponce87@hotmail.com](mailto:s_ponce87@hotmail.com)

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

[Victor.guerrero@epn.edu.ec](mailto:Victor.guerrero@epn.edu.ec)

**Quito, DICIEMBRE 2011**

## DECLARACIÓN

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

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por normativa institucional vigente

Diego Sebastián Ponce Cahuasquí

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que bajo mi supervisión, el presente proyecto de titulación fue realizado en su totalidad por el señor Diego Sebastián Ponce Cahuasquí.

Víctor Hugo Guerrero Ph.D.

Director del Proyecto

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme salud y la bendición de vivir cada día.

Al Dr. Víctor Guerrero por ser una guía tanto en el LAEV como en la dirección de este proyecto de titulación.

A mi hermanos Santi, Camilo y Daniel por haber sido muchas veces mis segundos padres y siempre entregarme todo su apoyo.

A mis amigos del LAEV: Ricardo Álvarez, Carlos Peña y Oscar Mejía por haber apoyado en la ejecución del proyecto. En especial a José Luis Dávila por haber sido un gran compañero de trabajo y por su gran ayuda en la consecución de este trabajo.

A las personas que trabajan en el LANUM, Jorge Cevallos, Ing. Salomé Galeas, Ing. Nelly Rosas, Ing. Emilio Cedeño y en especial a la Ing. Verónica Sotomayor por su constante apoyo.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Cecilia y Neptalí por todos estos años de cuidado, sacrificio y comprensión, ya que gracias a ellos y su formación, este objetivo puede ser alcanzado.

## CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>vi</b>
<b>CONTENIDO DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>CONTENIDO DE TABLAS</b> .....	<b>xv</b>
 <b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>POLÍMEROS Y COMPUESTOS BIODEGRADABLES</b> .....	<b>1</b>
1.1. MATERIALES BIODEGRADABLES POLIMÉRICOS .....	1
1.1.1. INTRODUCCIÓN A LOS POLÍMEROS BIODEGRADABLES.....	1
1.1.2. TIPOS DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES .....	7
1.1.2.1. Polímeros biodegradables naturales .....	7
1.1.2.2. Polímeros biodegradables modificados .....	10
1.1.2.3. Polímeros sintéticos .....	12
1.2. SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA).....	13
1.2.1. SÍNTESIS Y COMPOSICIÓN DEL PLA.....	16
1.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PLA.....	22
1.2.2.1. Propiedades a tracción y flexión.....	23
1.2.2.2. Resistencia al impacto .....	23
1.2.3. BIODEGRADACIÓN DEL PLA .....	25
1.2.4. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DEL PLA .....	27
1.2.4.1. Secado y extruido .....	28
1.2.4.2. Moldeo por inyección .....	30
1.2.4.3. Moldeo por soplado y estiramiento .....	34
1.2.4.4. Moldeo de película y laminado (“film and sheet”).....	38
1.2.4.5. Soplado de película.....	39

1.2.4.6.	Termoformado .....	40
1.2.5.	APLICACIONES INDUSTRIALES DEL PLA .....	44
1.3.	COMPUESTOS BIODEGRADABLES .....	51
1.3.1.	FIBRAS NATURALES .....	51
1.3.2.	LA FIBRA DE ABACÁ .....	59
1.3.3.	BIOCOMPUESTOS “GREEN COMPOSITES” .....	63
1.3.3.1.	Procesamiento .....	64
1.3.3.2.	Biocompuestos elaborados a base de PLA .....	65
1.3.3.3.	Propiedades mecánicas de biocompuestos PLA/fibras naturales .....	67
1.4.	OBJETIVOS Y ALCANCE .....	70
1.4.1.	OBJETIVOS .....	70
1.4.2.	ALCANCE .....	71

## CAPÍTULO 2

<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>72</b>
2.1. MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO.....	72
2.1.1. MATERIALES .....	73
2.1.2. EQUIPOS.....	74
2.2. ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	82
2.2.1. ENSAYOS PRELIMINARES .....	83
2.2.1.1. Parámetros de moldeo por compresión de láminas de ácido poliláctico puro (PLA).....	85
2.2.1.2. Elaboración de láminas de material compuesto.....	90
2.2.2. SELECCIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE FIBRA DE ABACÁ UTILIZADA EN LOS COMPUESTOS.....	94
2.2.3. OBTENCIÓN DE PROBETAS NORMALIZADAS.....	94
2.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS FABRICADAS.....	96
2.3.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ACUERDO CON ASTM D 3039-08.....	96
2.3.2. ENSAYO DE FLEXIÓN DE ACUERDO CON ASTM D 7264 -07 .....	98
2.3.3. ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO CHARPY DE ACUERDO CON ASTM D 256- 10 .....	101
2.3.4. DENSIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	102

2.4.	PARÁMETROS DE SELECCIÓN DEL PROTOTIPO .....	102
2.4.1.	ANÁLISIS FUNCIONAL DEL MATERIAL .....	102
2.4.2.	COMPARACIÓN ENTRE POSIBLES PROTOTIPOS A REALIZARSE .....	105
2.4.3.	OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO.....	106
2.4.3.1.	Pruebas preliminares.....	106
2.4.3.2.	Diseño y proceso de fabricación del prototipo .....	109

### **CAPÍTULO 3**

	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>112</b>
3.1.	ENSAYOS PRELIMINARES.....	112
3.1.1.	PARÁMETROS ADECUADOS PARA EL MOLDEO POR COMPRESIÓN DE LÁMINAS DE PLA .....	114
3.1.2.	ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE MATERIAL COMPUESTO .....	120
3.1.3.	SELECCIÓN DEL PORCENTAJE DE FIBRA A UTILIZARSE EN LA ELABORACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	125
3.1.4.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS OBTENIDAS .....	128
3.1.4.1.	Ensayo de tracción.....	128
3.1.4.2.	Ensayo de flexión .....	137
3.1.4.3.	Ensayo de resistencia al impacto .....	143
3.1.4.4.	Densidad de los materiales compuestos .....	148
3.1.5.	COMPUESTOS DE PLA FRENTE A OTROS MATERIALES COMPUESTOS .....	150
3.1.6.	ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO .....	155
3.1.6.1.	Obtención del prototipo .....	161
3.1.6.2.	Proceso de fabricación del prototipo .....	164
3.1.7.	ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	170

### **CAPÍTULO 4**

	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>174</b>
4.1.	CONCLUSIONES .....	174



4.2. RECOMENDACIONES.....	177
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>179</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>182</b>

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1. Aplicaciones de los polímeros biodegradables. ....	3
Figura 1.2. Principales regiones que consumen polímeros biodegradables. ....	7
Figura 1.3. Apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico. ....	11
Figura 1.4. Representación de la molécula básica de ácido poliláctico. ....	14
Figura 1.5. Ácido láctico con sus isómeros D y L. ....	15
Figura 1.6. Síntesis y polimerización del ácido láctico para obtener PLA. ....	18
Figura 1.7. Vías de polimerización del L & D – ácidos lácticos. ....	19
Figura 1.8. Temperaturas de fusión ( $T_m$ ) y transición vítrea ( $T_g$ ) del PLA respecto a los polímeros comerciales más utilizados. ....	22
Figura 1.9. Pérdida de peso del PLA en función del tiempo. ....	27
Figura 1.10. Geometría típica de un tornillo para extrusión simple. ....	29
Figura 1.11. Componentes principales de una máquina para moldeo por inyección. ....	31
Figura 1.12. Ciclo de un proceso de moldeo por inyección. ....	32
Figura 1.13. Diagramas PVT para el PLA. ....	34
Figura 1.14. Fases para el procesamiento de botellas a base de PLA. ....	35
Figura 1.15. Fases de un procesamiento ISBM de PLA. ....	37
Figura 1.16. Moldeo de película y laminado. ....	39
Figura 1.17. Proceso de moldeo por película soplada. ....	40
Figura 1.18. Etapas para el termoformado de PLA. ....	43
Figura 1.19. Malla a base de PLA para direccionamiento correcto del crecimiento de un hueso. ....	45
Figura 1.20. a) Elementos de fijación para unión de huesos fracturados. b) Esta figura muestra la formación del nuevo hueso mientras el tornillo a base de PLA se degrada. ....	45
Figura 1.21. Representación esquemática de las fibras naturales más utilizadas. ....	53
Figura 1.22. Resistencia máxima a la tracción de compuestos poliéster-abacá. .	56
Figura 1.23. Resistencia máxima a la flexión de compuestos poliéster-abacá ....	57
Figura 1.24. Fibras de abacá. ....	61
Figura 1.25. Curvas esfuerzo vs. deformación de la fibra de abacá. ....	62

Figura 1.26. Propiedades a flexión de compuestos de PLA/abacá. ....	69
Figura 2.1. Prensa Calefactora marca CARVER modelo 4128.....	75
Figura 2.2. Balanza digital marca ADAM modelo PGL 6001.....	75
Figura 2.3. Molde metálico y placas de aluminio.....	76
Figura 2.4. Medidor de temperatura marca Fluke y termocupla tipo J. ....	76
Figura 2.5. Prensa hidráulica de 12 toneladas para enfriamiento de láminas bajo presión.....	77
Figura 2.6. Estufa para secado del PLA y de la fibra natural marca Venticell. ....	77
Figura 2.7. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS. ....	78
Figura 2.8. Máquina de impacto Tinius Olsen modelo IT 504. ....	79
Figura 2.9. Equipos utilizados en la medición de las dimensiones de las probetas. ....	79
Figura 2.10. Espectrofotómetro infrarrojo marca PerkinElmer.....	80
Figura 2.11. Estufa para calentamiento de láminas Thermo Scientific modelo Cimarec. ....	80
Figura 2.12. Molde de acero para termoformado. ....	81
Figura 2.13. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo Super L.....	81
Figura 2.14. Estrategia metodológica para la obtención de láminas de PLA. ....	82
Figura 2.15. Estrategia metodológica para la elaboración de materiales compuestos de matriz de ácido poliláctico y reforzados con fibras de abacá. ....	83
Figura 2.16. Pilosidad en los extremos de la fibra de abacá almacenada.....	85
Figura 2.17. Aplicación de cera desmoldante sobre el molde. ....	86
Figura 2.18. Colocación de los pellets de PLA en el molde. ....	87
Figura 2.19. Moldeo tipo sánduche de los materiales compuestos. ....	92
Figura 2.20. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción, según norma ASTM D 3039-08.....	95
Figura 2.21. Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión, según la norma ASTM D 7264/ -07.....	95
Figura 2.22. Dimensiones de la probeta para determinar la resistencia al impacto, según la norma ASTM D 256-10.....	96
Figura 2.23. Nomenclatura marcada en las probetas para ensayo de tracción. ..	97

Figura 2.24. Procedimiento aplicado para la obtención de los productos a base de PLA y materiales compuestos.....	108
Figura 2.25. Calentamiento de las láminas. ....	110
Figura 2.26. Termoformado de las láminas con el molde de acero ensamblado en la máquina universal de ensayos. ....	110
Figura 2.27. Diagrama de procesos para la elaboración del prototipo. ....	111
Figura 3.1. Lijado de las paredes del molde para mejorar el acabado superficial. ....	113
Figura 3.2. (a) Distribución correcta de los pellets, (b) fallas producidas por la falta de fusión de los pellets. ....	114
Figura 3.3. Presencia de pellets no fusionados en los extremos de la lámina. ...	115
Figura 3.4. Fallas superficiales e internas del PLA por exceso de temperatura de procesamiento. ....	116
Figura 3.5. Lámina de PLA con abundantes poros internos.....	118
Figura 3.6. Apertura del molde en la fase de moldeo.....	118
Figura 3.7. Lámina de ácido poliláctico pandeada por el enfriamiento a temperatura ambiente. ....	119
Figura 3.8. Lámina de ácido poliláctico fracturada al momento de desmoldarse. ....	119
Figura 3.9. Prensa utilizada en el enfriamiento lento con aplicación de presión. ....	120
Figura 3.10. Láminas de material compuesto con zonas donde la fibra no está cubierta por la matriz completamente. ....	122
Figura 3.11. a) Espectroscopia infrarroja de una muestra de PLA puro sin zonas afectadas b) Espectroscopia infrarroja de una probeta obtenida de las zonas blanquecinas de una lámina de material compuesto. ....	123
Figura 3.12. Láminas de material compuesto con zonas donde la matriz ha sufrido degradación. ....	124
Figura 3.13. Láminas de material compuesto de matriz de ácido poliláctico reforzada con fibra natural (Dimensiones de las láminas 239 x 239 mm).....	125
Figura 3.14. Resistencia a la tracción vs. porcentaje de fracción volumétrica de fibra dispersa de 10mm.....	127

Figura 3.15. Resistencia máxima a la flexión vs. porcentaje de fracción volumétrica de fibra dispersa de 10 mm.....	127
Figura 3.16. Curvas Esfuerzo vs. deformación de los materiales compuestos elaborados y de la matriz de ácido poliláctico.* .....	130
Figura 3.17. Curvas Esfuerzo vs. deformación de los materiales elaborados y de la fibra de abacá.....	131
Figura 3.18. (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%. .....	133
Figura 3.19. Curvas esfuerzo vs. deformación a la flexión de materiales compuestos de fibra de abacá y matriz de ácido poliláctico.* .....	138
Figura 3.20. (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%. .....	141
Figura 3.21. (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%. .....	146
Figura 3.22. (a) Matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%. .....	148
Figura 3.23. Láminas de PLA termoformadas sin molde.....	161
Figura 3.24. (a) diseño normal, (b) diseño final del prototipo, (c) molde macho-hembra.....	162
Figura 3.25. Molde macho-hembra de madera y caja de material compuesto termformada en el mismo.....	163
Figura 3.26. Molde macho-hembra final construido en acero. ....	164
Figura 3.27. Bandejas resquebrajadas en los cambios bruscos de geometría. .	166
Figura 3.28. Fallas producidas en la base de la bandeja. ....	166
Figura 3.29. Bandeja unida al resto de la lámina de material compuesto. ....	167
Figura 3.30. Prototipos de PLA elaborados con láminas de 0,5; 1,0; 1,5 y 2,0 mm. ....	168

Figura 3.31. Prototipos elaborados a base de material compuesto reforzado con fibra dispersa de 10 mm al 0,13 de fracción volumétrica. Espesores 1,5 y 2,0 mm. ....	168
Figura 3.32. Diagrama de flujo del proceso de producción del prototipo.....	169

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1. Consumo global de polímeros biodegradables en (miles de toneladas). .....	5
Tabla 1.2. Productos y fabricantes de plásticos biodegradables a base de almidón. .....	9
Tabla 1.3. Propiedades físicas del PLA.....	22
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas del PLA según su peso molecular. ....	23
Tabla 1.5. Resistencia al impacto según su peso molecular.....	24
Tabla 1.6. Propiedades mecánicas del PLA y de algunos polímeros comerciales. .....	25
Tabla 1.7. Propiedades frente a la biodegradación del PLA. ....	26
Tabla 1.8. Tiempos de secado del material bajo una corriente de aire de 0,016 m <sup>3</sup> / (min kg).....	28
Tabla 1.9. Productos y aplicaciones del PLA en la industria médica.....	45
Tabla 1.10. Aplicaciones del PLA en la actualidad.....	49
Tabla 1.11. Aplicaciones especiales del PLA.....	50
Tabla 1.12. Producción aproximada en toneladas de fibra en el mundo.....	54
Tabla 1.13. Condiciones para el crecimiento de fibra. <sup>21</sup> .....	54
Tabla 1.14. Incremento de las propiedades a tracción de materiales de resina poliéster reforzados con cabuya. ....	59
Tabla 1.15. Propiedades de la fibra de abacá del sector de Santo domingo de los Tsáchilas. ....	62
Tabla 1.16. Diferencias entre las fibra cultivadas.....	63
Tabla 1.17. Propiedades a tracción e impacto de biocompuestos de PLA- fibra natural.....	67
Tabla 2.1. Propiedades del PLA 2002D producido por NatureWorks LLC.....	73
Tabla 2.2. Propiedades de la fibra de abacá de variedad Tangongón rojo. ....	74
Tabla 2.3. Espesor requerido para elaborar las láminas de acuerdo con los ensayos mecánicos. ....	86
Tabla 2.4. Definición de la presión en la fase de moldeo para obtener láminas de PLA.....	88

Tabla 2.5. Temperaturas de las placas de la prensa y del molde consideradas durante la fase de moldeo para obtener láminas de PLA.....	88
Tabla 2.6. Definición del tiempo en la fase de moldeo (t) para obtener láminas de PLA.....	89
Tabla 2.7. Definición de la presión en la fase de moldeo (P) para obtener el material compuesto. ....	93
Tabla 2.8. Temperaturas de las placas de la prensa y del molde consideradas durante la fase de moldeo para obtener láminas de material compuesto.....	93
Tabla 2.9. Definición del tiempo en la fase de moldeo (t) para obtener el material compuesto.....	94
Tabla 2.10. Condiciones para el ensayo de tracción en la máquina universal de ensayos. ....	96
Tabla 2.11. Nomenclatura utilizada para nombrar las probetas ensayadas por tracción.....	97
Tabla 2.12. Nomenclatura utilizada para nombrar las probetas ensayadas.....	99
Tabla 2.13. Nomenclatura utilizada para nombrar las probetas ensayadas.....	101
Tabla 2.14. Alternativas propuestas para la elaboración del prototipo.....	107
Tabla 3.1. Tiempos de secado de insumos.....	113
Tabla 3.2. Presiones aplicadas a lo largo del moldeo de PLA. ....	115
Tabla 3.3. Temperaturas aproximadas fijadas en la prensa.....	116
Tabla 3.4. Tiempos aproximados de moldeo de PLA.....	117
Tabla 3.5. Cantidad de material y fibra.....	120
Tabla 3.6. Presiones definidas para el moldeo de materiales compuestos.....	122
Tabla 3.7. Tiempos de moldeo de materiales compuestos. ....	124
Tabla 3.8. Inspección visual para definir las fracciones máximas y mínimas de fibra a añadir en la matriz. ....	126
Tabla 3.9. Eficiencia del refuerzo en la matriz.....	130
Tabla 3.10. Propiedades a tracción de polímeros comunes en la industria. ....	134
Tabla 3.11. Variación de las propiedades mecánicas a tracción respecto a la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de PLA-abacá. ....	136
Tabla 3.12. Variación de las propiedades mecánicas a flexión respecto a la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de PLA-abacá.....	142



Tabla 3.13. Variación de la resistencia al impacto respecto a la de la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de abacá-PLA en probetas sin muesca. ....	144
Tabla 3.14. Variación de la resistencia al impacto respecto a la de la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de abacá-PLA en probetas con muesca. ....	146
Tabla 3.15. Densidades teóricas y reales de los materiales compuestos elaborados. ....	149
Tabla 3.16. Propiedades mecánicas de compuestos de PLA y fibras naturales de abacá. ....	150
Tabla 3.17. Propiedades mecánicas de la resina poliéster y compuesto reforzados con fibra de cabuya. ....	151
Tabla 3.18. Propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá. ....	151
Tabla 3.19. Propiedades mecánicas de compuestos de poliéster reforzado con fibras de abacá. ....	152
Tabla 3.20. Valoración de las características del material de acuerdo al análisis funcional. ....	156
Tabla 3.21. Resultado de la valoración de los criterios de selección. ....	158
Tabla 3.22. Peso específico del criterio aplicación ecológica. ....	159
Tabla 3.23. Peso específico del criterio proceso de conformado. ....	159
Tabla 3.24. Peso específico del criterio costo. ....	159
Tabla 3.25. Peso específico del criterio resistencia. ....	160
Tabla 3.26. Peso específico del criterio ambiente de trabajo. ....	160
Tabla 3.27. Peso específico del criterio vida útil. ....	160
Tabla 3.28. Resultados del método de comparación de alternativas. ....	160
Tabla 3.29. Tabla de temperaturas y tiempos de calentamiento de las láminas a ser termoformadas. ....	165
Tabla 3.31. Costo de fabricación del molde de termoformado. ....	170
Tabla 3.32. Costo de la materia prima de prototipos elaborados de PLA puro. .	170
Tabla 3.33. Costo de la materia prima de prototipos elaborados de material compuesto. ....	171
Tabla 3.34. Costo de la materia prima de prototipos elaborados de polipropileno. ....	171

Tabla 3.35. Costo de los servicios básico utilizados. ....	171
Tabla 3.36. Costo de la mano de obra por prototipo. ....	172
Tabla 3.37. Costo de fabricación de cada producto. ....	172

## RESUMEN

En la última década, la demanda en la producción de polímeros biodegradables ha aumentado significativamente, debido a la creciente preocupación por la preservación del medio ambiente. Esto ha venido acompañado de un endurecimiento de las regulaciones por parte de los gobiernos con la finalidad de disponer de mejor manera los desechos que van a parar a los rellenos sanitarios. En este punto los polímeros biodegradables, como el ácido poliláctico, tienen una ventaja frente a los plásticos elaborados a base de petróleo, ya que con las condiciones de compostaje adecuadas los polímeros biodegradables pueden degradarse en un corto periodo de tiempo, disminuyendo así el volumen de desechos acumulados en los rellenos. Para el caso del ácido poliláctico esta degradación se da en un periodo de una semana a un mes. Sin embargo, muchos de estos polímeros presentan limitaciones en sus propiedades mecánicas y en su alto costo para el desarrollo de mayores aplicaciones. Una alternativa para superar estos inconvenientes consiste en crear biocompuestos o compuestos verdes donde la matriz biodegradable es reforzada con fibras naturales. Esto permite obtener materiales que aprovechan la alta resistencia de la fibra sin afectar el carácter biodegradable de la matriz, obteniendo así un material “completamente biodegradable”.

El presente proyecto de titulación se centra en la elaboración y caracterización mecánica de probetas de ácido poliláctico (PLA) puro, y de compuestos de esta matriz, reforzada con fibra natural de abacá. Inicialmente, se definió una estrategia metodológica hasta conseguir los parámetros más adecuados para el moldeo por compresión de los materiales. Estos fueron la presión, temperatura y tiempos de moldeo. Una vez que se definieron estos parámetros se elaboraron láminas de material compuesto con diferentes fracciones volumétricas de fibra. Estas láminas se sometieron a inspección visual y pruebas no normalizadas para definir los porcentajes máximos y mínimos de fibra a adicionar. Estas fracciones volumétricas fueron 0,13 y 0,20. Con estos datos se elaboraron láminas de material compuesto, tanto de fibra corta dispersa de 10 mm como de fibra continua unidireccional. A continuación, se caracterizaron mecánicamente tanto la

matriz de PLA como los materiales compuestos elaborados con las fracciones máximas y mínimas. Esta caracterización se realizó mediante tres ensayos mecánicos normalizados: (i) tracción bajo norma ASTM 3039-08, (ii) flexión bajo norma ASTM D7264-07 e (iii) impacto bajo norma ASTM D256-10. Como resultado se encontró que para los materiales reforzados con fibra corta dispersa de 10 mm, la adición de fibra no mejora las propiedades de tracción y flexión, pero si incrementa la resistencia al impacto. Sin embargo, para la configuración de fibra continua unidireccional tanto al 0,13 y 0,20 de fracción volumétrica, las propiedades mejoran. Siendo la mejor la de 0,20 con un incremento de hasta del 165% en la resistencia a la tracción (132 MPa) y de 130% en el módulo de elasticidad (9.223 MPa). En la resistencia a la flexión (104,4 MPa) y en el módulo de flexión (5.570 MPa) se tuvieron incrementos de 50 y 100%, respectivamente. Estos valores permitieron superar las propiedades mecánicas a tracción de resistencia y módulos de elasticidad de algunos plásticos comunes en la industria como el PET (50 MPa, 1.700 MPa), el polietileno de alta densidad (10-60 MPa, 60.290 MPa), el polipropileno (26 MPa, 1.389 MPa).

Además, al comparar las propiedades de la mejor formulación de este estudio con resultados obtenidos en otros materiales compuestos elaborados en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN, tenemos que en general las propiedades a tracción y flexión son: (i) comparables a los materiales híbridos de abacá/fibra de vidrio / resina poliéster, compuestos de polipropileno/abacá y (ii) superiores en un 50% a los materiales compuestos de cabuya/poliéster y compuestos de polietileno reforzados con fibra de abacá. Asimismo, en bicompuestos, con PLA como matriz, los resultados obtenidos en la mejor formulación arrojan resultados comparables a los alcanzados en la resistencia a la tracción con el refuerzo de lino (70 MPa), algodón y yute (100 MPa). Finalmente, se fabricó un molde de acero para la elaborar un prototipo mediante termoformado de láminas, tanto de PLA como de material compuesto. El prototipo fabricado es una bandeja para productos alimenticios que a su vez funciona como caja para recuerdos. Durante el proceso de termoformado se determinó experimentalmente que el mínimo espesor de la lámina a termoformar es de 0,5 mm para el PLA y de 1,5 mm para composites de PLA reforzados con fibra

dispersa de abacá. De igual manera, se determinó que al elaborar bandejas de material compuesto se reduce el uso de matriz de ácido poliláctico disminuyendo el costo en materia prima del producto; sin embargo, aumenta el rubro de mano de obra debido al procesamiento. En conclusión, con este estudio se aporta con un material compuesto biodegradable con una gran gama de posibles aplicaciones en diferentes industrias.

## PRESENTACIÓN

En el presente estudio se elaboraron materiales compuestos de matriz de ácido poliláctico (PLA) reforzados con fibras naturales de abacá con dos diferentes configuraciones de fibra y dos fracciones volumétricas. Estos materiales fueron elaborados con la motivación de mejorar las propiedades mecánicas que la matriz de PLA presenta, tomando en cuenta que este polímero es un material disponible de manera industrial en el mundo. En varios países se lo usa en diferentes aplicaciones como son el empaquetamiento de productos, hardware, partes de autos, fibras textiles u otros, que favorecen los esfuerzos de mitigación medioambiental. Con estos materiales, se determinaron las propiedades mecánicas de los compuestos obtenidos y se elaboró un prototipo mediante termoformado de láminas. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto PIC-08-493 “Desarrollo de Nuevos Materiales para Aplicaciones Estructurales e Industriales”, el cual es impulsado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT).

En el primer capítulo se hace referencia a la información fundamental que se maneja cuando se habla de materiales poliméricos y compuestos biodegradables. Inicialmente se abordan temas básicos y la terminología, para a continuación detallar la clasificación de los polímeros biodegradables. Dentro de esta clasificación está incluido el ácido poliláctico (PLA), el cual cumple la función de matriz polimérica en este trabajo. Se escogió este material debido a que en comparación a otros polímeros biodegradables posee una alta resistencia a la tracción y un módulo de Young elevado, que le ha abierto camino en la generación de mayores aplicaciones. Además tiene excelentes propiedades de barrera frente permeantes orgánicos, lo que le ha permitido incursionar en la industria del empaquetamiento. De igual manera, se presenta un breve resumen de las características de las fibras utilizadas como refuerzo de matrices poliméricas, especialmente la fibra de abacá. Finalmente, se muestran propiedades obtenidas en estudios realizados sobre materiales compuestos biodegradables que al final del estudio permiten comparar las propiedades obtenidas con las ya existentes.

En el segundo capítulo se inicia listando las características de los materiales empleados para la obtención de las láminas de matriz pura de PLA como de las láminas de los compuestos reforzados con fibra y a su vez los equipos utilizados para la fabricación y caracterización de estos materiales. Seguidamente se define la estrategia metodológica empleada para obtener las láminas. Además, se presentan los procedimientos llevados a cabo para la caracterización mecánica de los materiales elaborados. Finalmente, se definen los pasos seguidos para seleccionar y fabricar un prototipo.

En el tercer capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la experimentación detallada en el Capítulo 2. Se exponen los resultados alcanzados después de ejecutada la estrategia metodológica definida para la selección de los parámetros de moldeo más eficaces. Seguidamente, se presentan y discuten los resultados de la caracterización mecánica de las probetas normalizadas elaboradas con los materiales, de donde se obtiene que tanto las matrices como los materiales compuestos tienen un comportamiento frágil, y que además para el caso de materiales reforzados con fibra dispersa de 10 mm al 13 y 20 vol%, las propiedades tanto a tracción como flexión no se incrementan en comparación a la matriz, no siendo ese el caso de los materiales reforzados con fibra larga unidireccional, donde se observaron incrementos de hasta el 165% en la resistencia a la tracción, 130% en el módulo de elasticidad y un 100% en sus propiedades a flexión. Para el caso de los ensayos de impacto los dos tipos de materiales mostraron aumentos en comparación a la matriz. Estos resultados han hecho que los compuestos de PLA reforzados con fibra continua unidireccional superen las propiedades mecánicas de materiales como el polipropileno, poliestireno, polietileno (PET) y polietileno de alta densidad, siendo solamente su limitante porcentaje de elongación respecto a estos materiales. Igualmente, las resistencias a tracción y módulo de elasticidad obtenidos arrojaron valores similares a biocompuestos de PLA reforzados con lino, fibra de algodón y yute. Finalmente, se muestra el prototipo fabricado utilizando los materiales obtenidos en este estudio.

En el cuarto y último capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones generadas durante todo el proceso de estudio, obtención y caracterización de

este tipo de materiales. Así se verifica el cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente y define una base para posibles investigaciones futuras de este tipo de materiales que se concentren en la fabricación de mayores aplicaciones tomando en cuenta las buenas propiedades mecánicas alcanzadas.



# CAPÍTULO 1

## POLÍMEROS Y COMPUESTOS BIODEGRADABLES

En este capítulo se hace referencia a la información fundamental que se maneja cuando se habla de materiales poliméricos y compuestos biodegradables. Inicialmente se abordan temas básicos y la terminología, para a continuación detallar la clasificación de los polímeros biodegradables. Dentro de esta clasificación está incluido el ácido poliláctico (PLA) el cual cumple la función de matriz polimérica en este proyecto. Asimismo, se detalla el proceso de síntesis del PLA a partir de recursos naturales, sus propiedades mecánicas, los métodos que se usan para su procesamiento y sus principales aplicaciones. De igual manera, se presenta un breve resumen de las características de las fibras utilizadas como refuerzo de matrices poliméricas especialmente la fibra de abacá. Finalmente, se muestran propiedades mecánicas obtenidas en estudios realizados sobre materiales compuestos biodegradables.

### 1.1. MATERIALES BIODEGRADABLES POLIMÉRICOS<sup>1</sup>

#### 1.1.1. INTRODUCCIÓN A LOS POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Según la norma ASTM<sup>2</sup> los plásticos biodegradables son plásticos degradables donde la degradación resulta por la acción natural de microorganismos como bacterias, hongos y algas. Esta degradación consiste en una cadena de reacciones en que las moléculas orgánicas pierden átomos de carbono y donde las moléculas más complejas se convierten en moléculas más simples. A su vez, esta degradación usualmente es causada por acción biológica, que comúnmente

---

<sup>1</sup> PLATT, David; Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006.

<sup>2</sup> ASTM D 6400-04; Standard Specification for Compostable Plastics; ASTM International; United States; 2004.

actúa simultáneamente con la degradación no biológica que puede ser causa por fotodegradación o por la acción de moléculas de agua (hidrólisis).

La biodegradación de los polímeros presenta una oportunidad para el mejor manejo de los residuos, ya que en promedio estos polímeros en condiciones de compostaje se pueden biodegradar en tiempos muy cortos (desde 1 semana hasta seis meses). Permitiendo así reducir la cantidad de desechos en los rellenos sanitarios. Sin embargo, el acondicionamiento de tierras para el proceso de compostaje requiere de una inversión inicial mayor para los gobiernos que lo quieran aplicar, ya que para acelerar el proceso de biodegradación se debe controlar temperaturas y humedades relativas de los rellenos. Por lo tanto, solamente algunos países desarrollados han invertido en el acondicionamiento de tierras que permitan una rápida biodegradación de los materiales. Esto ha creado una contradicción debido a que muchos países han iniciado en la utilización de polímeros biodegradables, a pesar de que estos todavía son difíciles de obtener en el mercado, sin haber invertido en zonas donde este tipo de polímeros van a ir a parar después de su vida útil. Esto implica que no solo basta con la utilización de polímeros biodegradables sino que también se debe tomar en cuenta que estos necesitan zonas adecuadas para cumplir su proceso de biodegradación de manera eficiente.

A partir de la definición de biodegradación aparece el concepto de compostaje, que se refiere al proceso de control de la descomposición biológica (biooxidación-biodegradación) de los materiales biodegradables para convertirse en humus, más concretamente en una sustancia conocida como "compost". En este proceso se generan los siguientes productos: dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica.

En cuanto al uso de los polímeros biodegradables estos han sido utilizados por alrededor de una década, pero solamente en los últimos 5 años han sido producidos en una escala comercial para suplir necesidades en productos rígidos y flexibles para el empaquetamiento, bolsas, rellenos de artefactos para

transporte, y productos para el servicio de alimentos.<sup>3</sup> De esta manera se han alcanzado diferentes grados de aceptación dependiendo de las aplicaciones antes mencionadas, tal y como se muestra en la Figura 1.1.

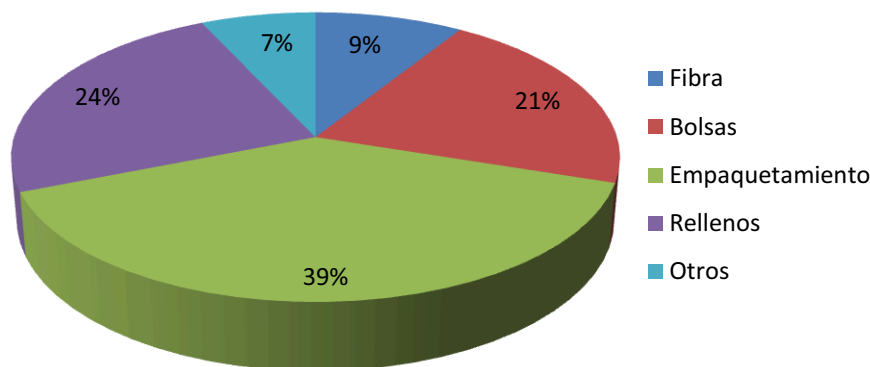


Figura 1.1. Aplicaciones de los polímeros biodegradables.<sup>4</sup>

Los polímeros biodegradables están siendo fabricados por un gran número de importantes empresas. Esto se debe a que en países desarrollados, principalmente aquellos que se encuentran en el hemisferio oeste del planeta, los gobiernos han implementado leyes para la reducción de la cantidad de basura que se recoge para ser enviada a los rellenos sanitarios. Por lo tanto, la utilización de estos polímeros es una alternativa frente a las opciones convencionales de manejo de basura, como son: el reciclaje mecánico de los desechos, la incineración con recuperación de energía y el compostaje. Esta corriente ha creado un ambiente favorable para el desarrollo de los polímeros biodegradables.

Además, existen también corrientes de empresas que reconocen el potencial comercial y beneficios del empaquetamiento denominado “verde y sustentable”, como también los consumidores se encuentran más preocupados acerca del desarrollo de tecnologías sustentables con reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y la

---

<sup>3</sup> PLATT, D; Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006; p.5.

<sup>4</sup> PLATT, D; Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006; p.9.

conservación de los recursos fósiles de la tierra; por ejemplo grandes cadenas comerciales como Wal-Mart han incursionado en el uso de polímeros biodegradables para reducir el uso de plásticos a base de petróleo. Para el 2.006 esta cadena substituyó más de 114 millones de recipientes usados para el empaquetamiento de frutas, hierbas y fresas.<sup>5</sup>

El Ecuador no es la excepción y desde hace más de tres años la Corporación Favorita (Supermaxi, Megamaxi) junto a la fábrica Flexiplast se han convertido en un ejemplo para el resto de empresas de comercialización ecuatorianas que entregan fundas a sus consumidores. Esto se debe a que las fundas que actualmente ellos utilizan tienen un valor del 10% más en comparación a las fundas comunes. Además, estas deben cumplir con diferentes requerimientos y normas, tales como la ASTM D882, ASTM D3826 y ASTM D6954-04, lo que aumenta su costo ya que estas pruebas de envejecimiento son llevadas en laboratorios especializados en Canadá. Sin embargo, todas estas medidas son tomadas sin ningún respaldo de los gobiernos de turno, más solamente nacen por propia iniciativa de la corporación.<sup>6</sup> Aunque es necesario recalcar que las fundas que ellos utilizan no son a base de polímeros biodegradables, sino siguen siendo elaboradas con polímeros a base de petróleo, pero que al momento de su fabricación se les administra un reactivo químico que hace que las largas moléculas de carbón e hidrógeno se rompan. Este proceso es conocido como la oxo-degradación.

La demanda de estos polímeros está beneficiando también la reducción de la diferencia de precio entre los plásticos obtenidos a base de derivados del petróleo y los biodegradables. Además, el constante incremento del valor del crudo y el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido la implementación e innovación de los procesos de fabricación. De esta forma es posible obtener materiales de mejor calidad, mayores volúmenes de producción y productos de menor costo. Para 1982, cuando se produjo el primer biopolíéster de uso

---

<sup>5</sup> Fuente: Maizar- Asociación Maíz y Sorgo Argentino; 2.006 <<http://www.maizar.org.ar/vertext.php?> >

<sup>6</sup> <http://ecuabusiness.blogspot.com/2008/09/supermaxi-se-pasa-fundas-biodegradables.html>

comercial, el kilogramo valía 1.600 dólares y actualmente, luego de muchos trabajos acerca de su producción, se llegó al precio de 2 dólares el kilogramo.<sup>7</sup>

Por otra parte, el mercado de los polímeros biodegradables ha mostrado un incremento en los últimos años gracias a la creación de nuevas y más grandes plantas productoras de estos materiales. Por ejemplo, en la década de los 80 la compañía química inglesa “Imperial Chemical Industries” (ICI) empezó a desarrollar el tema de los polímeros biodegradables. En un principio sus aplicaciones fueron muy limitadas debido a su menor resistencia y su elevado costo. Sin embargo, el grupo ICI (ahora bajo el nombre de AkzoNobel) opera actualmente en una red mundial de 152 fabricantes y distribuidores localizados en 37 países. Sus ventas para el 2003 fueron de alrededor de 3.000 millones de dólares.<sup>8</sup> A pesar de esto, el consumo de estos polímeros todavía es muy bajo en comparación a los polímeros a base de petróleo. Por ejemplo, para el 2005 solamente el 0,14% del total de plásticos utilizados en el mundo eran del tipo biodegradable. Sin embargo, estos valores de consumo se encuentran incrementando de una manera vertiginosa años tras año. Según datos históricos, que se muestran en la Tabla 1.1 el porcentaje de crecimiento anual en la producción de biopolímeros es del 17% en la última década.

Tabla 1.1. Consumo global de polímeros biodegradables en (miles de toneladas).<sup>9</sup>

<b>Año</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
<b>Almidón</b>	15,5	44,8	89,2
<b>PLA</b>	8,7	35,8	89,5
<b>PHA</b>	0,0	0,2	2,9
<b>Sintéticos</b>	3,9	14,0	32,8
<b>Total:</b>	28,1	94,8	214,4

El incremento en la producción de polímeros biodegradables se debe a las siguientes razones:

<sup>7</sup> Fuente: Revista tecnológica del plástico; “En la era de los biodegradables”; Vol. 20; Edición 1, enero - febrero 2005; Ángela Barriga Salamanca. <<http://www.biopackcolombia.com/media/revisplastico.htm>>

<sup>8</sup> Fuente: Revista tecnológica del plástico; “En la era de los biodegradables”; Vol. 20; Edición 1, enero - febrero 2005; Ángela Barriga Salamanca. <<http://www.biopackcolombia.com/media/revisplastico.htm>>

<sup>9</sup> PLATT, D; Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006; p.5.

- Desarrollo de nuevas regulaciones para disminuir los desechos que van a parar en rellenos sanitarios con el fin de aumentar el reciclaje y el compostaje.
- La industria de polímeros biodegradables ha logrado obtener materiales que cumplen con los requerimientos necesarios para la fabricación de productos capaces de ser utilizados en varias aplicaciones.
- Acondicionamiento de más zonas donde se pueda llevar a cabo el proceso de biodegradación y compostaje, en los principales países consumidores como Japón, Australia, China, Nueva Zelanda, Francia, Suiza, Alemania.
- Como se mencionó anteriormente, la diferencia de precio entre los polímeros biodegradables y los plásticos a base de petróleo ha disminuido en los últimos años. Además, ha aumentado el interés por parte de los consumidores y productores por utilizar productos sustentables.
- Grandes cadenas comerciales reconocen el beneficio de promocionar y utilizar productos verdes.

En cuanto a las regiones de consumo de polímeros biodegradables, el oeste de Europa es la región líder en la utilización de este tipo de polímeros. Esto se debe a que en ciertas regiones del mundo se han emitido mayores y más estrictas regulaciones, un claro ejemplo son países como Estados Unidos y Japón. Además, se incluyen algunos países de Europa donde se controla la regulación de los desechos que se acumulan en las ciudades. En la Figura 1.2 se muestran los porcentajes de las zonas donde van a parar los productos biodegradables producidos en el mundo:

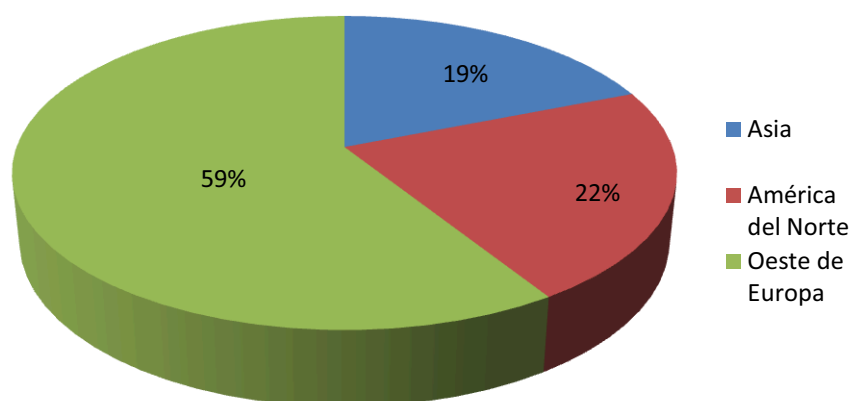


Figura 1.2. Principales regiones que consumen polímeros biodegradables.<sup>10</sup>

### 1.1.2. TIPOS DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES<sup>11</sup>

Los polímeros biodegradables pueden clasificarse básicamente en tres categorías principales:

**a) Polímeros naturales:** como la celulosa, el almidón, y las proteínas.

**b) Polímeros naturales modificados:** como el acetato de celulosa o los polialcanoatos.

**c) Polímeros sintéticos:** como los poliésteres alifáticos formados por cadenas lineales, a diferencia de los poliésteres insaturados (aromáticos) donde sus cadenas están compuestas de grupos benceno, que son los de uso común, las poliesteramidas y los poliuretanos, entre otros.

#### 1.1.2.1. Polímeros biodegradables naturales

Estos polímeros son producidos por todos los organismos vivos. Las reacciones de biodegradación son catalizadas con enzimas y ocurren en un medio acuoso. Estas macromoléculas contienen uniones hidrolizables, es decir que al entrar el

<sup>10</sup> PLATT, D; Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006; p.7.

<sup>11</sup> YU, L; Biodegradable polymer blends and composites from renewable resources; Wiley; 2.009, New Jersey, USA.

material en contacto con el agua, el agua penetra en la matriz polimérica y provoca hinchamiento, hidratación de las moléculas y finalmente la ruptura de la cadena principal en varias partes. Entre estas macromoléculas tenemos a las proteínas, celulosa y almidón, que generalmente son susceptibles a la biodegradación bajo la acción de enzimas, las mismas que son proteínas que actúan como aceleradores de las reacciones químicas de síntesis y degradación de compuestos, y que son producidas por los microorganismos (bacterias, hongos, plantas). Estas enzimas pueden ser de tres tipos (i) hidrolíticas, (ii) oxidantes y (iii) reductoras, dependiendo del tipo de reacción que controlen. En este caso, actúan las enzimas hidrolíticas, ya que aceleran las reacciones para producir componentes más simples por reacción con moléculas de agua. El carácter hidrófilico/hidrofóbico afecta a la velocidad de biodegradación y mejora el rendimiento en su durabilidad en condiciones húmedas.

Estos polímeros son los de mayor aplicación y tienen como principal representante al almidón, el cual es un termoplástico de carácter fuertemente hidrófilico, de bajo coste y de alta disponibilidad. Este puede utilizarse como aditivo biodegradable o material de sustitución en plásticos tradicionales, ya que en teoría acelera la degradación o la fragmentación de las cadenas de los polímeros sintéticos. La acción microbiana consume el almidón, creando poros en el material, que pueden llevar a su rotura. Entre los plásticos biodegradables basados en el almidón y comercializados actualmente se puede citar sus mezclas con: polietileno de baja densidad (EcoStar), polietileno y poliésteres (Ecolan), derivados de bajo peso molecular del petróleo (Novon), un polímero soluble en agua y plastificante (Biofil), y policaprolactona (Greenpol). Algunos de estos productos con sus respectivos fabricantes y aplicaciones en la industria, son presentados en la Tabla 1.2.



Tabla 1.2. Productos y fabricantes de plásticos biodegradables a base de almidón.<sup>12</sup>

Productos	Fabricante/País	Aplicaciones
EcoStar Pc100	EcoStar/USA	Embalajes de consumo, salud y belleza, electrónica, hardware.
EcoStar Hs1002		
EcoStar PG300		
ECO-3	Novon Japan Inc/ Japón	Apto para aplicaciones obtenidas a través de extrusión, inyección, laminado, soplado.
PCL	Greenpol Co./ Corea	Apto para aplicaciones obtenidas a través de extrusión, inyección, laminado, soplado.

A su vez, la celulosa es el polímero natural más abundante por lo que esta y sus derivados han sido ampliamente investigados como potencial material biodegradable. A pesar de que la celulosa natural no puede ser procesada con facilidad, puede convertirse en un material biodegradable mediante modificaciones químicas que alteren su estructura altamente ordenada. Se puede citar, como ejemplo, el acetato de celulosa (AC) que se caracteriza por una elevada resistencia a la tracción, y la celulosa oxidada que contiene una porción sustancial de funciones carboxílicas y se usa como gasas estériles y fajas para cortar hemorragias.

<sup>12</sup> Fuente: Páginas web de las empresas productoras de los polímeros:

-<http://www.ecostarplastics.com/markets/consumer-products/>

-<http://www.tomo-e.co.jp/e/product/resins/novon.html>

- <http://plasticsnews.com/china/english/headlines-arc2.html?id=1276883575>

### 1.1.2.2. Polímeros biodegradables modificados

Dentro de esta categoría se encuentran los poliésteres cuyos grupos funcionales son degradables hidrolíticamente. Esto les confiere un gran interés en el campo de los biomateriales, ya que pueden ser utilizados para realizar implantes y reemplazar la función de tejidos dentro de un sistema vivo. Los polímeros preparados a partir de ácido glicólico (PGA) y ácido poliláctico (PLA) tienen una aplicación muy extensa en el campo de la medicina, específicamente en suturas biodegradables que se comercializan desde los años 60. Desde entonces, diversos productos basados en el ácido láctico y glicólico, incluyendo otros materiales, como homopolímeros y copolímeros de policaprolactona (PCL), y copolímeros de polidioxanona (PDO) han sido aceptados para su uso en dispositivos médicos. Otra aplicación usual de los poliésteres son las bolsas de compostaje y envasado. Actualmente, empresas multinacionales como Danone y McDonald's están interesadas en el desarrollo de este tipo de productos.

Debido a que este tipo de polímeros biodegradables son los más utilizados mundialmente, se presenta un breve resumen de los más conocidos de este grupo:

**Ácido Poliglicólico (PGA):** es el poliéster alifático lineal más simple. Fue utilizado para desarrollar la primera sutura sintética totalmente absorbible y se comercializó como DEXON en los años 60 por la empresa Davis & Geck, Inc. El monómero puede ser sintetizado mediante un proceso de dimerización del ácido glicólico, el cual por polimerización de apertura de anillo, produce un material de alto peso molecular y con un porcentaje de 1 - 3% de monómero residual. El polímero resultante se caracteriza por una elevada cristalinidad (45 - 55%), un alto punto de fusión (220 - 225°C) y una temperatura de transición vítrea de 35 - 40°C. No es soluble en muchos solventes orgánicos, a excepción de organofluorados como el hexafluoroisopropanol. Las fibras obtenidas a partir de PGA tienen un elevado módulo de Young y resistencia mecánica. Su rigidez dificulta su uso para suturas, excepto cuando se emplea como material trenzado. Las suturas de PGA pierden alrededor del 50% de su resistencia después de 2 semanas, el 100% en 1 mes, y son completamente absorbidas en un rango de 4 a 6 meses. El

poliglicólico ha sido copolimerizado con otros monómeros para reducir la rigidez de sus fibras.

**Ácido Poliláctico (PLA):** se obtiene mediante polimerización por apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico, como se presenta en la Figura 1.3. El monómero tiene un carbono asimétrico por lo que es factible preparar polímeros con diferentes tacticidades. El homopolímero derivado del monómero natural, L-láctico (L-PLA), presenta un elevado grado de cristalinidad (37%) debido a su estéreo-regularidad. El material tiene alta resistencia a la tracción y baja elongación, por lo que consecuentemente tiene un módulo de Young elevado. Este polímero es muy adecuado para aplicaciones que tienen que soportar una carga como son las suturas y fijaciones ortopédicas. Sus características térmicas están definidas por un elevado punto de fusión (175 - 178°C) y una temperatura de transición vítrea de 60 a 65°C.

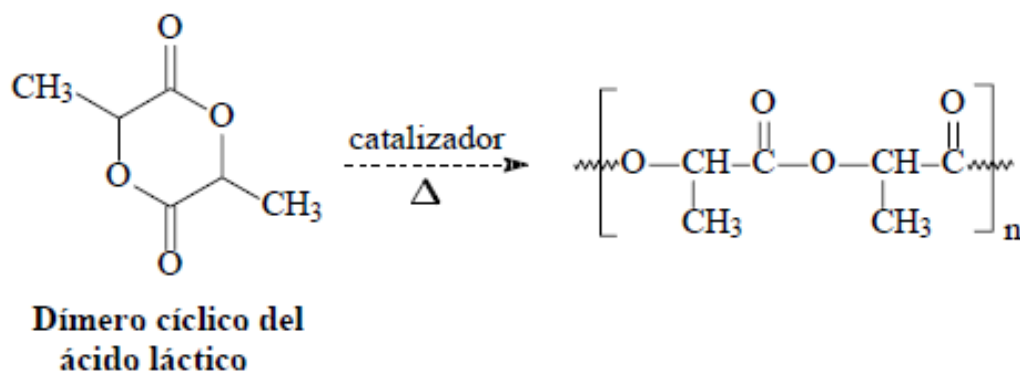


Figura 1.3. Apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico.

**Poli (láctico-co-glicólico):** copolímeros de ácido glicólico con ácido L-láctico y D,L-láctico han sido desarrollados para aplicaciones en sistemas liberadores de fármacos. Por ejemplo, un copolímero con 50% de ácido glicólico y 50% de ácido D,L-láctico se degrada más rápidamente que sus homopolímeros puros. El copolímero más importante presenta un 90% de ácido glicólico y un 10% de ácido L-láctico y es desarrollado por la casa comercial Ethicon como sutura absorbible bajo el nombre de VICRYL.

**Policaprolactona (PCL):** se prepara mediante la polimerización por apertura de anillo de la caprolactona. El polímero es semicristalino, presenta un punto de

fusión de 59 - 64°C y una temperatura de transición vítrea de 60°C. Además, se comporta como material biocompatible y es utilizado como sutura biodegradable. Debido a que la PCL tiene un intervalo de degradación elevado, del orden de 2 años, se han preparado copolímeros con D,L-láctico para aumentar la velocidad de bioabsorción. También se utilizan copolímeros en bloque de PCL-co-PGA (MONOCRYL), ya que ofrecen una menor rigidez comparada con el homopolímero PGA puro.

**Poliésteres alifáticos basados en dioles y diácidos:** el interés hacia los poliésteres alifáticos derivados de dioles y ácidos carboxílicos está aumentando desde la presentación del polímero BIONOLLE comercializado por Showa Highpolymer Co. desde 1990. Este polímero es sintetizado mediante una reacción de policondensación de etilenglicol, 1,4-butanodiol y ácidos dicarboxílicos tales como el succínico y el adípico. Debido a las facilidades de procesado y a las buenas propiedades que presenta, el polímero puede ser manufacturado como fibra textil y como plástico mediante inyección y extrusión. Sus aplicaciones abarcan bolsas de basura y compostaje, envases para cosméticos, alimentos, espumas, entre otros.

**Poliésteres basados en microorganismos:** muchas compañías buscan alternativas para disminuir los costes de fabricación de polímeros biodegradables. Un método empleado es la síntesis de polímeros usando microorganismos (bioingeniería). Los principales polímeros obtenidos por este método son los llamados polihidroxicanoatos. Actualmente la compañía Monsanto Co. comercializa un copolímero compuesto por polihidroxibutirato (PHB) y polihidroxicvalerato (PHV). El homopolímero puro de PHB es cristalino y muy frágil, mientras que el copolímero de PHB con PHV es menos cristalino, más flexible, y fácil de procesar. Estos polímeros normalmente requieren la presencia de enzimas para su degradación pero podrían degradar en una variedad de medios que están siendo estudiados para diversas aplicaciones biomédicas.

### 1.1.2.3. Polímeros sintéticos

Finalmente se puede citar otra familia de polímeros que, a pesar de su reducido consumo, tienen aplicaciones como materiales degradables conocidas como las

poliesteramidas. Estas poliestaramidas, tal y como indica su nombre son polímeros que contienen enlaces tipo éster (-COO-) y enlaces tipo amida (-CONH-) en la cadena principal. Actualmente, se comercializan dos poliesteramidas: BAK1095 y BAK2195 producidas por la casa comercial Bayer AG-Alemania. La primera es un copolímero constituido por ácido adípico, 1,4-butanodiol y caprolactama, totalmente biodegradable, con buenas propiedades y fácil procesado. Por su parte, el BAK2195 se basa en el ácido adípico y la hexametildiamina como componentes amida, y el ácido adípico con butanodiol y etilenglicol como componentes éster. Entre las potenciales aplicaciones del BAK está su uso en horticultura, agricultura, sectores alimenticios y como bolsas de basura. Es un termoplástico semicristalino, transparente, que se degrada en condiciones aeróbicas formando agua, monóxido de carbono y biomasa. Su velocidad de degradación es comparable a los materiales orgánicos que se descomponen bajo condiciones de compostaje.

Entre las poliesteramidas de mayor interés científico están aquellas derivadas de  $\alpha$ -aminoácidos, que constituyen un grupo interesante debido a su susceptibilidad hacia la degradación con enzimas proteolíticas. Aunque los poli- $\alpha$ -aminoácidos sintéticos podrían ser interesantes como materiales biomédicos, dado la presencia de componentes naturales, en la práctica tienen poca utilidad debido a su alta cristalinidad y difícil procesabilidad. Además, los polímeros constituidos por más de tres aminoácidos producen anticuerpos y, por tanto, no son apropiados para su uso en seres vivos. Para evitar estos problemas, se han estudiado distintos copolímeros constituidos por  $\alpha$ -aminoácidos. Así, por ejemplo derivados de tirosina y policarbonatos, son utilizados como implantes ortopédicos, dado su elevada resistencia.

## **1.2. SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)**

En este proyecto de titulación se definió al ácido poliláctico como matriz polimérica para la elaboración de los materiales compuestos. Cabe indicar que este material fue importado directamente por el Laboratorio de Nuevos Materiales

(LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional, ya que no es posible encontrarlo en el mercado nacional.

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, este biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades desde el estado amorfo hasta el estado cristalino las cuales pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros D (-) y L (+), los pesos moleculares y la copolimerización. En la Figura 1.4 se muestra la representación química de la molécula de ácido poliláctico.

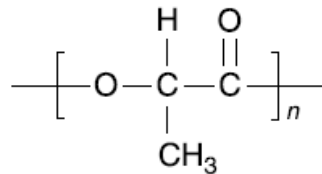


Figura 1.4. Representación de la molécula básica de ácido poliláctico.

El ácido láctico es utilizado ampliamente en la industria alimenticia, química, farmacéutica, del plástico, textil, agrícola, industria de alimentación animal, entre otras. Sin embargo, la aplicación más interesante del ácido láctico radica en la posibilidad que ofrece de producir ácido poliláctico (PLA). El ácido láctico, ácido 2-hidroxiopropanoico, es el ácido carboxílico más simple con un átomo de carbono asimétrico. Puede producirse por fermentación anaeróbica de substratos orgánicos, con microorganismos como hongos y bacterias. El ácido láctico obtenido de la fermentación es ópticamente activo, ya que cuando se hace pasar luz polarizada a través del material, esta emerge vibrando en un plano diferente. La producción específica de los isótopos L (+) o D (-), que se muestran en la Figura 1.5, puede determinarse utilizando un lactobacilo apropiado.

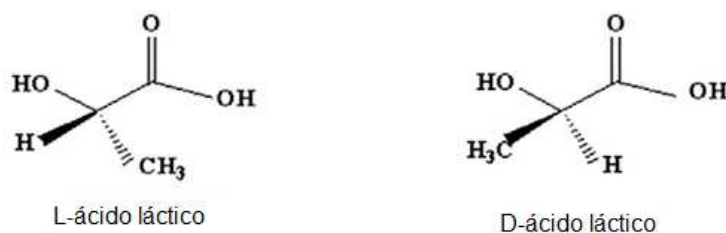


Figura 1.5. Ácido láctico con sus isómeros D y L.<sup>13</sup>

El PLA pertenece a la familia de los poliésteres cuya cadena principal está formada por la asociación de funciones éster. A su vez, pertenece al grupo de los alifáticos ya que los átomos en su cadena están unidos entre sí por enlaces sencillos o dobles de forma lineal o ramificada. El bloque de construcción de PLA, ácido láctico (ácido propiónico 2-hidroxi) puede existir activo ópticamente en d-l-o enantiómeros. Estos enantiómeros básicamente son los isómeros de ácido láctico que tienen las mismas propiedades físicas excepto la interacción con el plano de la luz polarizada. Dependiendo de la proporción de los enantiómeros se puede obtener material de PLA con propiedades diferentes. Esto permite la producción de una amplia gama de polímeros PLA para que cumplan con los requisitos de desempeño. El PLA tiene buenas propiedades ópticas, físicas, mecánicas y de barrera frente a los polímeros derivados del petróleo que se utilizan actualmente. Por ejemplo, los coeficientes de permeabilidad del CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O para el PLA son inferiores a los que presenta el poliestireno (PS), pero son superiores al PET. Además, las propiedades de barrera del PLA frente a los permeantes orgánicos, tales como el acetato de etilo y d-limoneno, son comparables al PET. Mecánicamente, un PLA no orientado es muy frágil, pero posee una buena resistencia y rigidez. De una manera orientada el PLA ofrece mejor rendimiento que el poliestireno orientado, pero con características comparables al PET. Los módulos de tracción y flexión del PLA son superiores a los del polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y poliestireno, pero la resistencia al impacto y alargamientos antes de la rotura son menores a los anteriores polímeros citados. En general, el PLA posee las propiedades mecánicas necesarias y

<sup>13</sup> MADHAVAN, N; NIMISHA, R; ROJAN, P; An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research; National Institute for Interdisciplinary Science and Technology (NIIST); India; Elsevier; 2010.

propiedades de barrera deseadas para un número de solicitudes que puedan competir con los termoplásticos a base de petróleo.

En la actualidad, los métodos de procesamiento principales para PLA se basan en el proceso de derretimiento. Este método consiste en calentar el polímero por encima de su punto de fusión, dando la forma deseada y mediante enfriamiento estabilizar sus dimensiones. Por lo tanto, el manejo del calor, la cristalización y el comportamiento en el fundido del material es crítico para optimizar el proceso de obtención de productos de calidad. Algunos de los ejemplos de procesos de fusión de PLA son el moldeo por inyección, termoformado, soplado, extrusión, entre otros. Con dichos procesos se pueden fabricar envases, copas, botellas, fibras para telas, alfombras y no tejidos, etc.

### 1.2.1. SÍNTESIS Y COMPOSICIÓN DEL PLA

La obtención de ácido poliláctico, cuyo proceso se ilustra en la Figura 1.6, ocurre generalmente en dos etapas consecutivas: (i) la síntesis del ácido láctico, y (ii) la polimerización. El primer paso en el proceso es la extracción del almidón de la biomasa. Industrialmente se utilizan como sustratos sacarosa proveniente de la caña de azúcar y remolacha azucarera, lactosa proveniente de lactosuero, y dextrosa procedente de almidón hidrolizado. La sacarosa refinada y glucosa son las más utilizadas. Para la extracción del almidón de productos no refinados se realiza un molido húmedo; a su vez, el almidón obtenido se convierte en azúcar por hidrólisis enzimática o ácida donde bacterias fermentan al licor azucarado. El *Lactobacillus delbrueckii* es el microorganismo más utilizado en la producción industrial, ya que tiene la ventaja de consumir eficientemente a la glucosa y ser termófilo con temperatura óptima de crecimiento en el rango de 45 a 62°C, lo que reduce costos de enfriamiento y esterilización, así como riesgos de contaminación microbiológica en el fermentador. Sin embargo, existen otros microorganismos en el mercado capaces de fermentar el almidón y que son utilizados para producir ácido láctico, tales como el *Lactobacillus amylophilus*, el *Lactobacillus amylovorus*, la *Saccharomyces cerevisiae*, la *Kluyveromyces lactis*, entre otros.



Adicionalmente, en el método de obtención comercial, al sustrato se le adiciona una fuente de vitaminas y de cofactores. Estos cofactores son sustancias no proteicas que aumentan la actividad de una enzima, en ausencia de estos, las enzimas pueden ser lentas o inactivas. En este caso estos cofactores son una mezcla de 10 al 15 % de glucosa, 10%  $\text{CaCO}_3$  y cantidades menores de fosfato de amonio y extracto de levadura. El medio se inocula y se agita sin aireación para optimizar la neutralización del ácido formado. La fermentación dura entre 2 a 4 días y termina cuando todo el azúcar es consumido con el fin de facilitar la purificación. Al final de la fermentación el medio es ajustado a pH 10 y calentado para solubilizar el lactato de calcio y coagular proteínas presentes.

Posteriormente, el medio se filtra para remover sustancias insolubles, así como biomasa. El ácido libre se obtiene por adición de ácido sulfúrico seguido de filtración para remover el sulfato de calcio formado. Esta conversión alcanza en general valores por encima del 95% en sustrato de carbohidratos. La fermentación puede realizarse tanto en procesos "batch" como continuos. El ácido láctico debe separarse del cultivo fermentable y purificarse antes de la polimerización en la mayoría de los casos. En resumen, los procesos de purificación más comunes involucran neutralización con bases seguidos por filtración, concentración y acidificación. Una vez que se ha obtenido el ácido láctico por medio de los procesos anteriores, existen dos vías fundamentales para convertirlo en polímeros de alto peso molecular: (i) el proceso indirecto vía láctido, cuyo producto se denomina poliláctido, y (ii) el proceso directo de polimerización por policondensación, produciendo ácido poliláctico. Ambos procesos se indican en la Figura 1.7.

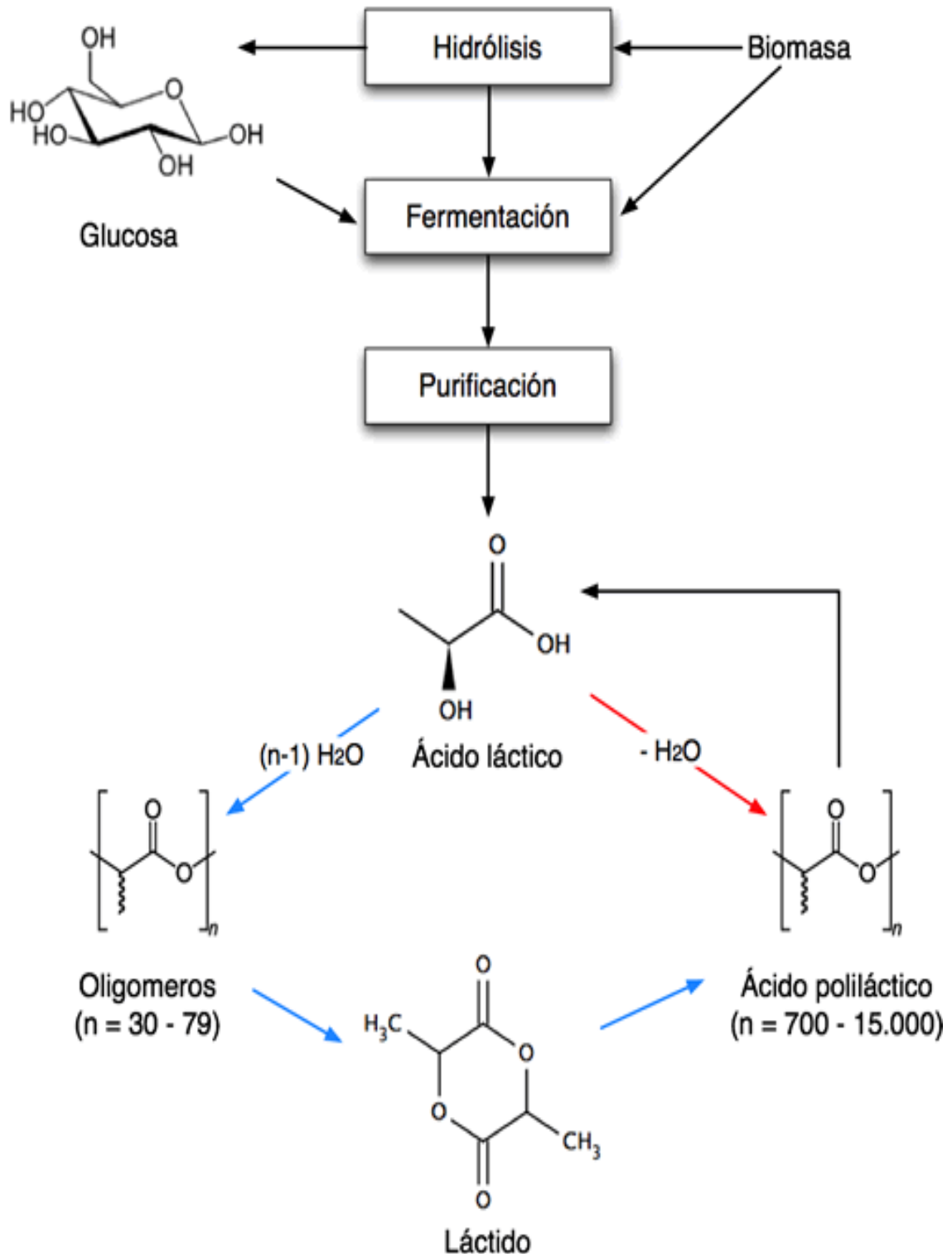


Figura 1.6. Síntesis y polimerización del ácido láctico para obtener PLA.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> <http://www.textoscientificos.com/polimeros/biogenerados>

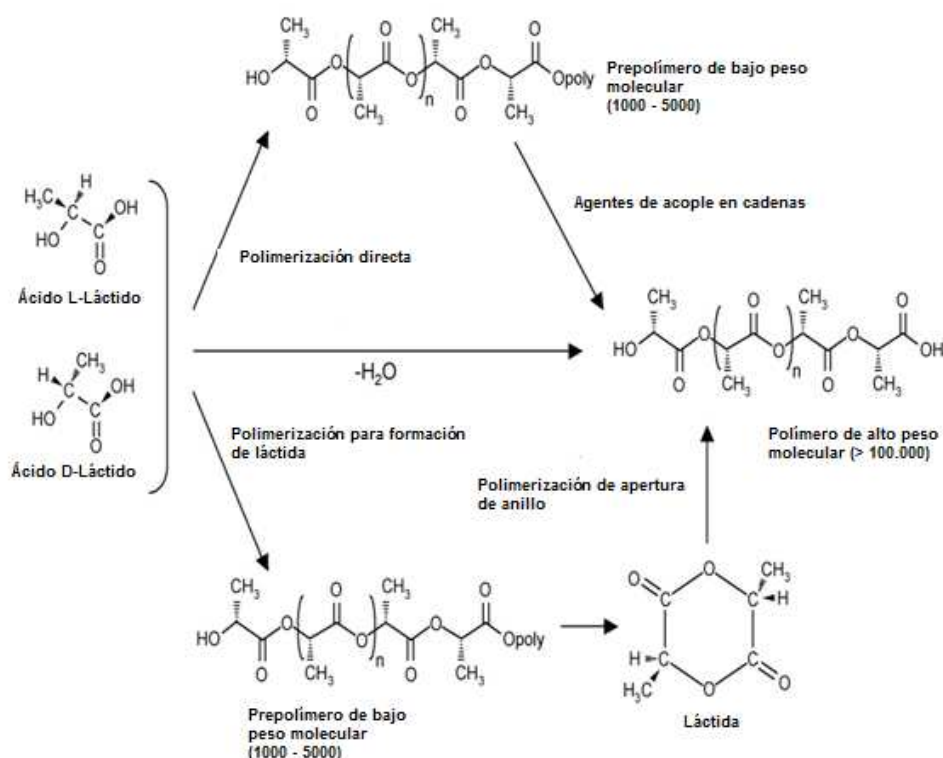


Figura 1.7. Vías de polimerización del L & D – ácidos lácticos.<sup>15</sup>

**(i) Polimerización indirecta o por apertura de anillo:** se lo conoce como el proceso continuo de polimerización por apertura de anillo (ROP por sus siglas en inglés) de lactida. La condensación del ácido láctico acuoso produce un prepolímero (oligomero) de bajo peso molecular. Este prepolímero se despolimeriza incrementando la temperatura de policondensación, reduciendo la presión y utilizando un catalizador organometálico, resultando así una mezcla de estereo isómeros de lactida. La mezcla de lactida es purificada por destilación al vacío, puesto que su composición determina las propiedades del producto final. Finalmente, el polímero de alto peso molecular se produce por polimerización catalítica por apertura del anillo del diláctido mientras que los monómeros remanentes se remueven por vacío y se reciclan.

<sup>15</sup> LIM, L; AURAS, R; Processing technologies for poly(lactic acid); University of Guelph-Canadá; Elsevier ; p: 822; 2008.

La apertura de anillo se produce debido a la acción de catalizadores/ iniciadores; tales como, las sales de metales de aluminio, estaño, titanio y cinc, los metales alcalinos, los complejos supramoleculares y los ácidos. Es generalmente, aceptado por los investigadores que la transición de iones metálicos de estaño cataliza el proceso de polimerización a través de un mecanismo de coordinación-inserción a temperaturas superiores a 150°C, donde las cadenas en crecimiento permanecen unidas al metal a través de un enlace alcóxico durante el proceso de propagación y la reacción termina dando lugar a grupos hidróxilos terminales. Los catalizadores de estaño pueden encontrarse con facilidad en el mercado. Además, pueden ser utilizados por los productores de PLA a gran escala. Por ejemplo, el 2-ethylhexanoato de estaño es un catalizador que ha sido aprobado como aditivo alimenticio y consecuentemente se utiliza más a menudo que otros catalizadores.

Adicionalmente, mejores procesos de polimerización de ácido láctico, con sales de estaño como catalizadores, pueden ser llevados a cabo en múltiples pasos. El ácido láctico se calienta a 150°C con un catalizador de estaño para obtener PLA oligomérico (con un grado de polimerización de 1-8). Los oligómeros entonces se calientan a 180°C bajo vacío (1.333 Pa) durante 5 horas para generar PLA de alto peso molecular MW (100.000). Por último, el tercer paso se lleva a cabo en el estado sólido por encima de la temperatura de cristalización,  $T_c$ , (105°C, de 66 Pa, 0,5 a 2 horas) y recocido a 150°C en un periodo de 10 a 30 horas. De este proceso se obtiene un PLA de peso molecular de hasta 600.000.

**(ii) Policondensación:** en la segunda vía, el ácido láctico es policondensado directamente en polímeros de alto peso molecular, manipulando el equilibrio entre: ácido láctico, agua y ácido poliláctico en un solvente orgánico. Son de alto peso molecular preparados a partir de PLLA, son parcialmente cristalinos con una temperatura de fusión ( $T_m$ ) de 175 a 180 °C, una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de 60 °C y una temperatura de cristalización ( $T_c$ ) de 100-105 °C, y la temperatura de descomposición ( $T_d$ ) de 185 a 190 °C. La copolimerización con ácido D-láctico y otros hidroxiacidos para obtener poliésteres con temperaturas de fusión inferiores y con mejores características de procesado térmico ha sido el avance para obtener materiales con más aplicaciones.

De acuerdo a lo explicado anteriormente, después de llevado a cabo el proceso de síntesis y polimerización, el ácido poliláctico se obtiene de la copolimerización del poli (ácido L-láctico) (PLLA) o poliláctida y poli(ácido D,L-láctico) (PDLLA), respectivamente, los mismo que provienen de los isómeros L (+) y D (-) del ácido láctico. Por lo tanto, las propiedades del PLA van a depender del porcentaje de estos isómeros en sus cadenas, del tiempo de recocido y de su peso molecular. Por este motivo, a continuación se presentan las propiedades tanto del PLA como de otras sustancias producidas a base de los isómeros L (+) y D (-) con la finalidad de evidenciar las diferencias que existen entre los materiales dependiendo de su composición.

El PLA tiene una cristalinidad de alrededor del 37%, una temperatura de transición vítrea entre 50 y 80°C y una temperatura de fusión entre 173 y 178°C. Debido a su doble cadena microestructural, las poliláctidas ópticamente puras, el poli (L-láctico) (PLLA) y el poli (D-láctico) (PDLA), son semicristalinos. La densidad del poli (ácido L-láctico) ha sido reportada en el valor de 1,248 g/ml y para su estado cristalino PLLA en el valor de 1,290 g/ml. La densidad de sólidos de poliláctida en diversos estudios ha sido reportada como 1,360 g/ml para L-láctico, 1,330 g/ml del meso-láctico, 1,360 g/ml para la poliláctida cristalina y 1,250 g/ml para poliláctida amorfa.

En general, las poliláctidas son solubles en dioxano, acetonitrilo, cloroformo, cloruro de metileno, 1,1,2-tricloroetano y los ácidos dicloroacético, etil benceno, tolueno, acetona y tetrahidrofurano. Las poliláctidas son fácilmente solubles cuando se calientan a temperaturas de ebullición. Las tasas más rápidas de la cristalización pura de PLA se encuentran en la temperatura de 110 - 130°C, lo que en genera morfología cristalina esferulítica. La forma cristalina del PLA es soluble en disolventes clorados y en el benceno a temperaturas elevadas. El PLA puede ser cristalizado por enfriamiento lento, recocido por encima de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). Normalmente, las poliláctidas son insolubles en agua, algunos alcoholes y alcanos.

En la Tabla 1.3 se exponen las propiedades físicas del PLA de acuerdo al porcentaje de láctida y finalmente en la Figura 1.8 se muestra la comparación

entre las temperaturas de transición vítrea y de fusión del PLA respecto a diferentes polímeros comunes:

Tabla 1.3. Propiedades físicas del PLA.<sup>16</sup>

% L-(L/D,L)- PLA	Temperatura de transición vítrea T <sub>g</sub> (°C)	Temperatura de fusión T <sub>m</sub> (°C)	Densidad g/ml
100,0	60,0	184,0	1,2577
98,0	61,5	176,2	1,2601
92,2	60,3	158,5	---
87,5	58,0	---	1,2614
80,0	57,5	125,0	1,2651

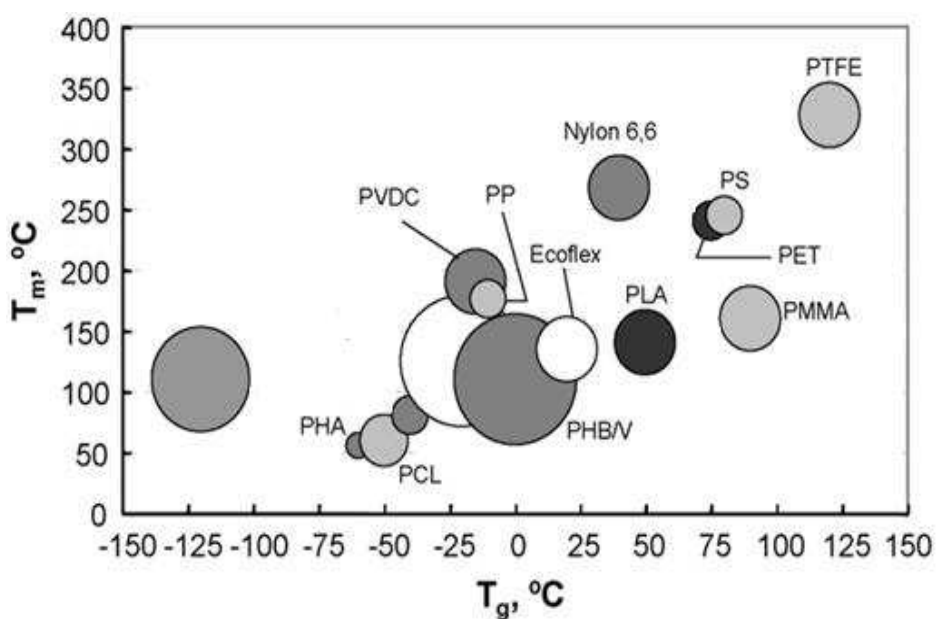


Figura 1.8. Temperaturas de fusión (T<sub>m</sub>) y transición vítrea (T<sub>g</sub>) del PLA respecto a los polímeros comerciales más utilizados.<sup>17</sup>

<sup>16</sup> LIM, L; AURAS, R; Processing technologies for poly(lactic acid); University of Guelph-Canadá; Elsevier ; 2008; p.823.

<sup>17</sup> LIM, L; AURAS, R; Processing technologies for poly(lactic acid); University of Guelph-Canadá; Elsevier , 2008.

## 1.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PLA<sup>18</sup>

### 1.2.2.1. Propiedades a tracción y flexión

El PLA semicristalino tiene una resistencia a la tracción del orden de 50 a 70 MPa, un módulo a la tracción en un rango de 3000 a 4000 MPa, elongación a la ruptura del 2 al 10%, resistencia a la flexión de 100 MPa y un módulo a la flexión de 4.000 a 5.000 MPa. En la Tabla 1.4 se muestra el efecto en el comportamiento a tracción y flexión dependiendo del peso molecular del PLA.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas del PLA según su peso molecular.<sup>19</sup>

Propiedad	Unidades	PLA Tipo I	PLA Tipo II	PLA Tipo III
<b>Peso molecular</b>	(M <sub>w</sub> )	47.500	75.000	114.000
<b>Resistencia a la tracción</b>	(MPa)	40	44	44
<b>Elongación a la ruptura</b>	(%)	7,5	4,8	5,4
<b>Módulo de elasticidad a la tracción</b>	(MPa)	3.650	4.050	3.900
<b>Resistencia a la flexión</b>	(MPa)	84	86	88
<b>Deformación máxima a la flexión</b>	(%)	4,8	4,1	4,2
<b>Módulo de elasticidad a la flexión</b>	(MPa)	3.500	3.550	3.600
<b>Dureza</b>	RW H	78	72	76

### 1.2.2.2. Resistencia al impacto

El objetivo principal de la prueba de impacto es observar el comportamiento de una material al ser impactado por un objeto en un punto específico. Esta prueba, es probablemente una de las más difíciles de interpretar. Para este tipo de materiales los valores de resistencia al impacto se obtienen mediante la ejecución

<sup>18</sup> BASTIOLI, C; Handbook of Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2005.

<sup>19</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:142.

de un ensayo de impacto Izod o charpy, a diferencia de otros polímeros donde estas propiedades se logran gracias a un ensayo de impacto por caída de dardo. Esta diferencia en el ensayo se da por dos razones fundamentales: (i) Las aplicaciones del PLA generan elementos donde existen cambios de geometría considerables y (ii) normalmente se trabajan con elementos de PLA de bajos espesores sometidos a cargas de impacto puntuales.

Dependiendo de la aplicación las probetas para la medición de la resistencia al impacto pueden o no tener una muesca. Esto depende de la geometría del elemento donde el material va a ser utilizado, ya que la resistencia al impacto del PLA es afectada por la muesca fabricada en las probetas de ensayo. Los valores de resistencia al impacto Izod, del PLA se encuentran en el rango de 2 a 3 kJ/m<sup>2</sup> para materiales de baja cristalinidad. Sin embargo, la resistencia al impacto Izod con muesca los valores se reducen de 1,50 a 1,23 kJ/m<sup>2</sup>. El efecto de la muesca hace decrecer los valores de resistencia al impacto y en una investigación publicada en la revista “Polymer International” los autores Griijpma –Alteper reportaron que el decrecimiento de los valores está relacionado con el radio de la muesca.<sup>20</sup> En la Tabla 1.5 se muestran los valores de resistencia al impacto para PLA de diferentes pesos moleculares.

Tabla 1.5. Resistencia al impacto según su peso molecular.<sup>21</sup>

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>PLA Tipo I</b>	<b>PLA Tipo II</b>	<b>PLA Tipo III</b>
Izod, con muesca	(KJ/m <sup>2</sup> )	1,8	1,7	1,8
Izod, sin muesca	(KJ/m <sup>2</sup> )	13,5	14,0	15,0

<sup>20</sup> GRIJPMA, D; ALTEPER, H; Improvement of the mechanical properties of poly (D,L-lactide) by orientation; Polymer International; volume 51; 2002; p. 845-851.

<sup>21</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:142.



En la Tabla 1.6, se presentan valores de las propiedades más importantes del PLA comparadas con algunos de los polímeros más comunes utilizados en la industria. Estos datos permitirán más adelante comparar tanto los resultados de las propiedades de la matriz de ácido poliláctico como los valores de los ensayos de los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá.

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas del PLA y de algunos polímeros comerciales.<sup>22</sup>

Denominación	Modulo de tracción (MPa)	Resistencia al impacto (J/m)	Módulo a la flexión (MPa)	Porcentaje de elongación a la ruptura (%)
PLA	3.834	24,6	3.689	4
Poliestireno	3.400	27,8	3.303	2
iPP	1.400	80,1	1.503	400
Polietileno de alta densidad	1.000	128,1	800	600

### 1.2.3. BIODEGRADACIÓN DEL PLA

El método más importante de degradación del PLA es la hidrólisis. Bajo condiciones secas el PLA puro puede durar más de 10 años. Los cambios en las propiedades del PLA durante la hidrólisis han sido estudiados por varios autores principalmente para desarrollo de aplicaciones en diferentes industrias del PLA, principalmente en la industria médica, con la finalidad de observar el comportamiento del material frente a la degradación y poder diseñar biomateriales para la inserción de estos como prótesis en el cuerpo humano. En la Tabla 1.7 se presentan valores en la variación del peso molecular, temperatura de transición vítrea y de la temperatura de fusión del PLA en un periodo de observación de 35 días de degradación.

<sup>22</sup> BASTIOLI, C; Handbook of Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2005; p:291.

Tabla 1.7. Propiedades frente a la biodegradación del PLA.<sup>23</sup>

<b>Días</b>	<b>Pérdida peso (%)</b>	<b>Peso molecular (Mw)</b>	<b>Tg (°C)</b>	<b>Tm (°C)</b>
0	0	80.000	64,0	155,8
7	1	35.000	56,1	154,7
14	4	4.000	50,0	149,7
21	14	2.200	48,7	146,3
28	27	2.000	51,9	142,8
35	28	2.000	51,9	143,4

Como complemento en la Figura 1.9 se muestra la pérdida en peso molecular del PLA cuando es sometido a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa. Esto permite conocer el tipo de condiciones en que se debe conservar el PLA para que no sufra degradación antes y después de procesarlo. De acuerdo a la figura las mejores condiciones son las representadas en la parte superior del gráfico, es decir el PLA puede almacenarse en temperaturas de hasta 40°C y humedades relativas del 50%, ya que en esas condiciones, como se observa, el peso molecular del material tiende a mantenerse constante a través del tiempo.

---

<sup>23</sup> ROBY, M.S; Proceedings of Biopolymers-Advances in Medical and Material Science Applications, Cambridge, MA, USA, 2001.

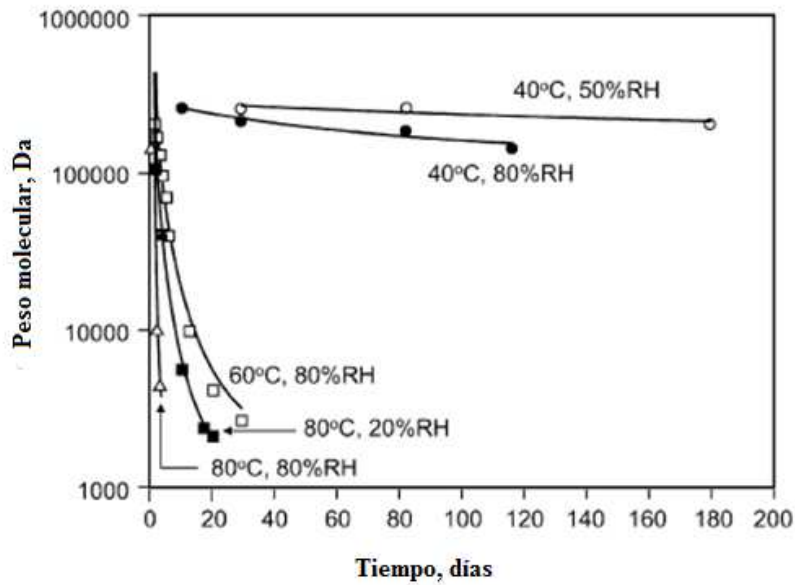


Figura 1.9. Pérdida de peso del PLA en función del tiempo.<sup>24</sup>

#### 1.2.4. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DEL PLA<sup>25</sup>

En esta sección se presentan los procesos de fabricación más utilizados para obtener productos de PLA. Entre los métodos más importantes y comunes en la industria se tiene:

- Secado y extruido: como paso previo al procesamiento del PLA.
- Moldeo por inyección: para la elaboración de elementos con geometrías complejas y que necesitan un alto grado de precisión.
- Moldeo por soplado y estiramiento: utilizado para la fabricación de botellas biodegradables.
- Moldeo de película y laminado: para la elaboración de láminas de bajos espesores y filmes para el empaquetamiento de productos.
- Soplado de película: para producir filmes de PLA con orientación biaxial que produce láminas y filmes de PLA con mejores propiedades mecánicas.

<sup>24</sup> HENTON, D; GRUBER, P; LUNT, J; RANDALL, J, Polylactic acid technology; Natural fibers, biopolymers, and biocomposites; Boca Raton, FL: Taylor & Francis; 2005; p. 527–577.

<sup>25</sup> LIM, L; AURAS, R; Processing technologies for poly(lactic acid); University of Guelph-Canadá; Elsevier, 2008.

- Termoformado: para la elaboración de elementos con geometrías simples (contenedores) y que no necesitan un alto grado de precisión.

#### 1.2.4.1. Secado y extruido

Este proceso se inicia con el secado del PLA para prevenir la excesiva hidrólisis que puede comprometer las propiedades físicas del polímero. Normalmente es secado a menos de 100 ppm de contenido de humedad. El secado del PLA se da en rangos de temperatura de 80 a 100°C y el tiempo del mismo depende de la temperatura de secado y de la geometría de los pellets, los cuales son el resultado de someter al material a un proceso de molienda, compactación y secado, como se muestra en la Tabla 1.8. Cabe señalar nuevamente que como el PLA se degrada a altas temperaturas y elevadas humedades relativas, se debe mantener el material en lugares no expuestos a dichas condiciones.

**Tabla 1.8. Tiempos de secado del material bajo una corriente de aire de 0,016 m<sup>3</sup>/ (min kg).<sup>26</sup>**

Temperatura de secado (°C)	Geometría del pellet	Tiempo aproximado de secado (h)
60	Cristalinos	3,3
70	Cristalinos	2,1
80	Cristalinos	1,3
100	Cristalinos	0,6

Después del secado se extruye. La extrusión es fundamental en el fundido continuo del PLA y en algunos de los sistemas de moldeo utilizados que se explicarán más adelante. A continuación se presenta un esquema de los componentes más importantes de una extrusora utilizada para el procesamiento de PLA.

---

<sup>26</sup> LIM, L; AURAS, R; Processing technologies for poly(lactic acid); University of Guelph-Canadá; Elsevier , 2008; p.829.

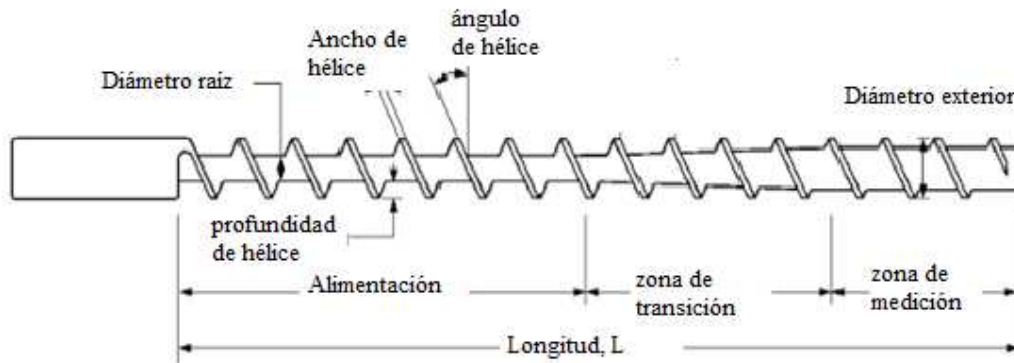


Figura 1.10. Geometría típica de un tornillo para extrusión simple.<sup>27</sup>

Como se observa en la Figura 1.10 un tornillo para la extrusión de material consta de tres secciones importantes: (i) la sección de alimentación que recibe los pellets y transporta los mismos hacia el tornillo, (ii) la sección de transición conocida como sección de compresión o fundido, donde los pellets se comprimen y se genera la fricción y contacto con el cilindro gracias a la acción de las hélices del tornillo, y (iii) la sección donde se dosifica el material fundido.

La eficiencia o utilidad del tornillo depende de la relación  $L/D$  (longitud del tornillo/diámetro exterior), ya que tornillos con una grande relación  $L/D$  proveen un buen calentamiento, mejor mezclada y un mayor tiempo para el fundido del material. Normalmente los radios más utilizados se encuentran en valores de 24-30. Otro parámetro del tornillo es su relación de compresión, la cual es la relación entre la profundidad de la sección de alimentación y la profundidad de la sección de dosificación. Para procesar PLA se recomienda utilizar tornillos coeficientes de compresión de 2-3.

Durante el proceso de plastificación los pellets de PLA pueden ser alimentados a través de una tolva cercana a la extrusora. Esta se conecta a la sección de alimentación del tornillo. A su vez, el tornillo, guiado por un motor, rota y transporta el material hacia el final del mismo. El calor necesario para fundir el material se provee por resistencias pegadas alrededor del cilindro contenedor.

<sup>27</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:195.

Este mantiene el calor a través de mantas calefactoras aislantes enrolladas a su alrededor. El resto de energía se obtiene por la propia rotación del tornillo que empuja al material hacia el exterior y se produce fricción con las paredes que generan el calor necesario para el fundido de los pellets. En resumen, en una extrusora tanto la acción de los calentadores como de la propia fricción del material con las paredes generan la energía para fundir el material.

Debido a que las propiedades reológicas (deformación y flujo de la materia) del PLA dependen de la temperatura y el peso molecular, estos deben ser tomados en cuenta durante el diseño de los equipos y en el moldeamiento, simulación y optimización de los procesos. Asimismo, dentro de la extrusora, debido al uso de temperaturas excesivas, se puede iniciar la degradación del material con la formación de monómeros de láctida o acetaldehído. Para el primer caso la aparición de láctida puede afectar la pureza óptica y las propiedades materiales del PLA. Para el caso del acetaldehído se debe evitar su formación principalmente en material que va a ser utilizado para la producción de botellas, contenedores o films para empaquetamiento de productos, ya que estas sustancias afectan el sabor de los alimentos, perjudicando la aceptación por parte del consumidor del producto empaquetado.

#### **1.2.4.2. Moldeo por inyección**

El moldeo por inyección de material es el proceso más utilizado para procesar artículos termoplásticos, especialmente para aquellos que son complejos en su forma y necesitan alta precisión en el dimensionamiento. Todas las máquinas de inyección poseen una extrusora para el fundido del material, las cuales son diseñadas de manera adecuada para que entreguen la cantidad necesaria de material para el moldeo. En la Figura 1.11 se presenta un sistema de inyección básico.

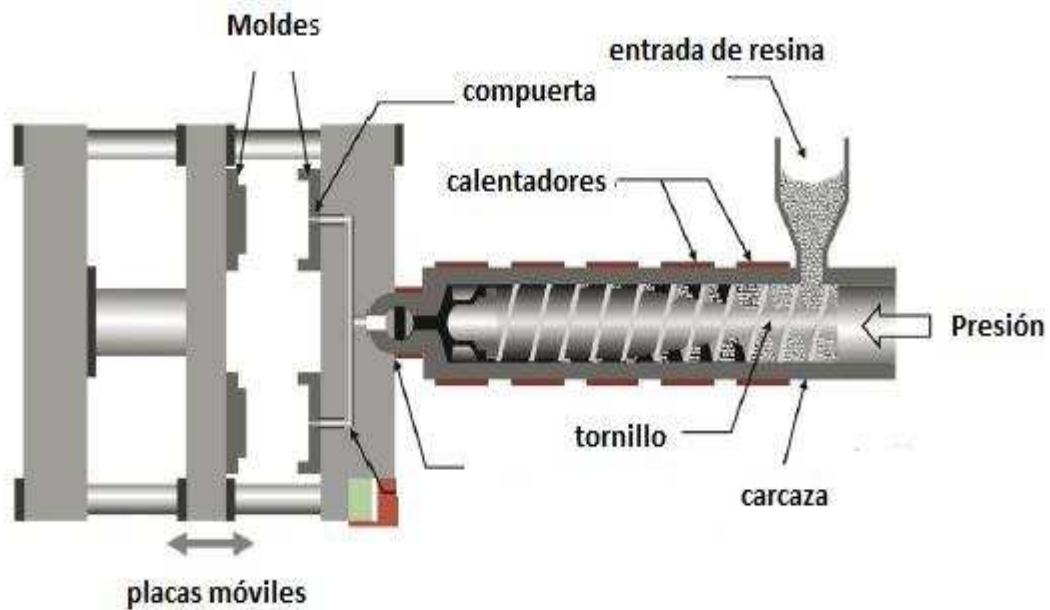


Figura 1.11. Componentes principales de una máquina para moldeo por inyección.

La mayoría de máquinas para el procesamiento de PLA se basan en un extrusor de tornillo recíprocante con sistema de dos estaciones, el cual integra al disparador y el tornillo en una sola máquina. Este sistema de dos estaciones consiste en una extrusora lineal integrada a un disparador. La primera etapa plastifica y alimenta la colada hacia el disparador bajo una relativa baja presión, donde la colada es inyectada dentro de las tuberías transportadoras “hot runners” las cuales transportan la colada a alta presión hacia los disparadores. En el caso de esta extrusora recíprocante el tornillo puede girar durante la mayoría del tiempo que dura el proceso de moldeo.

En la Figura 1.12 se presentan las fases más comunes en el procesamiento de polímeros moldeados por inyección. Entre ellas tenemos: (1) Inyección del polímero, (2) entrada del polímero en la cavidad de moldeo, (3) enfriamiento del molde, (4) apertura del molde, (5) salida del producto inyectado, (6) cerrado del molde. Además, (A) avance del tornillo, (B) plastificación del tornillo, (C) regreso del tornillo.

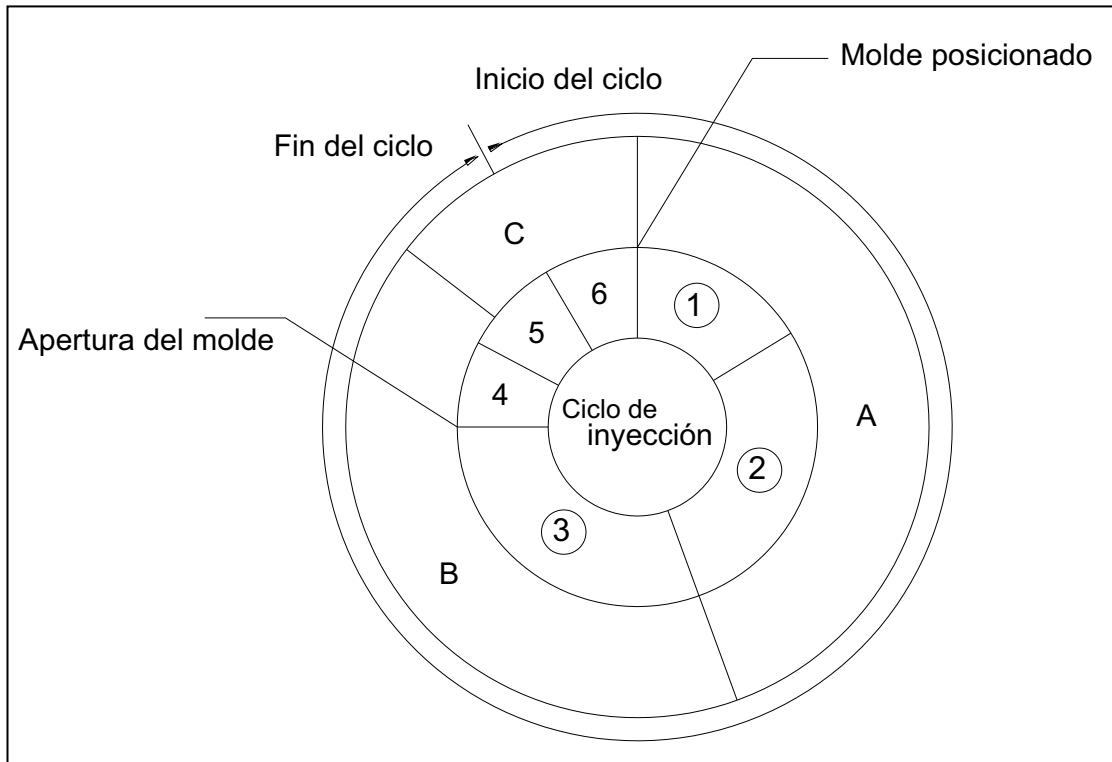


Figura 1.12. Ciclo de un proceso de moldeo por inyección.<sup>28</sup>

De acuerdo con la Figura 1.12, el ciclo inicia después de que la boquilla se abre y el tornillo empieza a moverse hacia adelante permitiendo la inyección del polímero dentro de la cavidad de moldeo. Para compensar la contracción del material durante el enfriado en el molde, el tornillo se mantiene en la posición de avance gracias a la acción de una presión constante. Al final de esta fase, la boquilla se cierra y el tornillo empieza a recuperarse, mientras que las partes continúan siendo enfriadas en el molde. Durante esta fase de recuperación, el tornillo gira y transporta el polímero a lo largo del mismo. Al mismo tiempo, el tornillo puede deslizarse con el cilindro con una presión controlada gracias a un cilindro hidráulico. En el ciclo de moldeo, la transferencia de calor se da primordialmente en la fase de llenado, transporte y enfriamiento, además de existir enfriamiento en la fase de apertura del molde. El tiempo que se tarda en realizar cada ciclo es un parámetro muy importante que muchas veces se minimiza para obtener mayores producciones. Existen algunas maneras de reducir este tiempo; por ejemplo, es

<sup>28</sup> REES, H; Understanding injection molding technology; Cincinnati: Hanser/Gardner publication; 1995.



común enviar parte de la inyección enfriada a un dispositivo de enfriamiento posterior, también se suele exponerla a un régimen de aire. Además es evidente que minimizar la duración de los eventos no procesables como la apertura del molde, inyección y cerrado del molde es importante para reducir el tiempo total del ciclo. Disminuyendo la temperatura también se puede incrementar el régimen de extracción de calor del polímero. A pesar de eso, la láctida es propensa a la condensación en superficies frías lo que puede afectar el terminado de la superficie y el peso, además de limitar la temperatura mínima que puede ser usada durante el proceso de inyección del PLA a 25 - 30°C.

El proceso de llenado, transporte y enfriamiento son eventos que tienen lugar durante el moldeo por inyección y tienen una importante implicación en el enfriamiento de la pieza moldeada, es decir en el proceso de compresión de las partes y generación de esfuerzos residuales. Por este motivo es importante conocer la relación que existe entre la presión, temperatura y volumen del material en sus diferentes estados. Estos efectos pueden ser modelados matemáticamente y graficados aplicando el modelo de Tait, el mismo que suele ser utilizado también en la simulación de procesos de inyección mediante elementos finitos para predecir la contracción de las piezas. En la Figura 1.13 se observan diagramas PVT para un proceso de inyección, obtenidos aplicando el método de dos dominios de Tait.<sup>29</sup>

---

<sup>29</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:198.

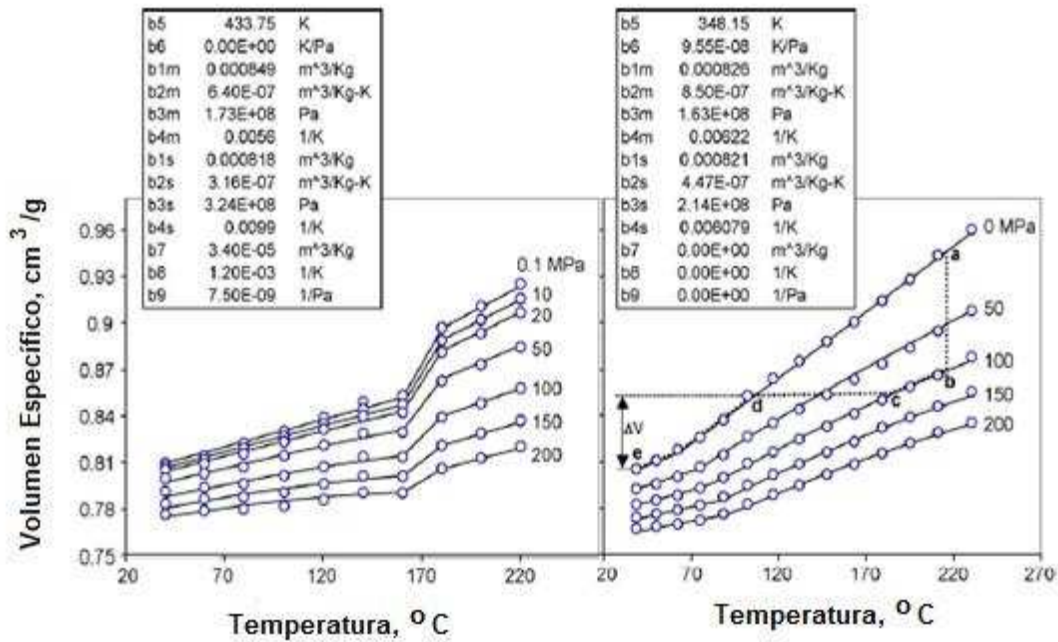


Figura 1.13. Diagramas PVT para el PLA.<sup>30</sup>

#### 1.2.4.3. Moldeo por soplado y estiramiento

Debido a que actualmente los consumidores se preocupan por temas medioambientales, existe el interés de quienes manejan la industria alimenticia por reemplazar la utilización de termoplásticos no-biodegradables por PLA. Actualmente se fabrican botellas a base de PLA para el embotellamiento de ciertas bebidas que no son sensibles al oxígeno como la leche pasteurizada. A pesar que las propiedades de barrera del PLA pueden ser mejoradas bajo la aplicación de diferentes tecnologías, su implementación es limitada debido a su alto costo de producción. La producción de botellas a base de PLA se logra a través del proceso de soplado por inyección y estiramiento (ISBM: injection stretch blow molding). Con este proceso se producen botellas de PLA orientadas biaxialmente que mejoran de gran manera las propiedades de barrera comparado con el proceso de moldeo por inyección de PLA. La orientación molecular durante el ISBM permite disminuir el efecto de agrupamiento estabilizando el volumen del

<sup>30</sup> SATO, Y; INOHARA, K; TAKISHIMA, S; MASUOKA, H; IMAIZUMI; YAMAMOTO, H; Pressure-volume-temperature behavior of polylactide, poly(butylene succinate), and poly(butylene succinate-co-adipate); Polym Eng Sci 2000.

polímero. Los cristalitas producidos durante el proceso de tensión inducida por cristalización reducen el efecto de agrupamiento, ya que estos pueden actuar como conexiones para estabilizar la fase amorfa, que reduce la fragilidad del material.

En la Figura 1.14 se presentan paso a paso cada uno de los procesos que se realizan para la obtención de botellas a base de PLA.

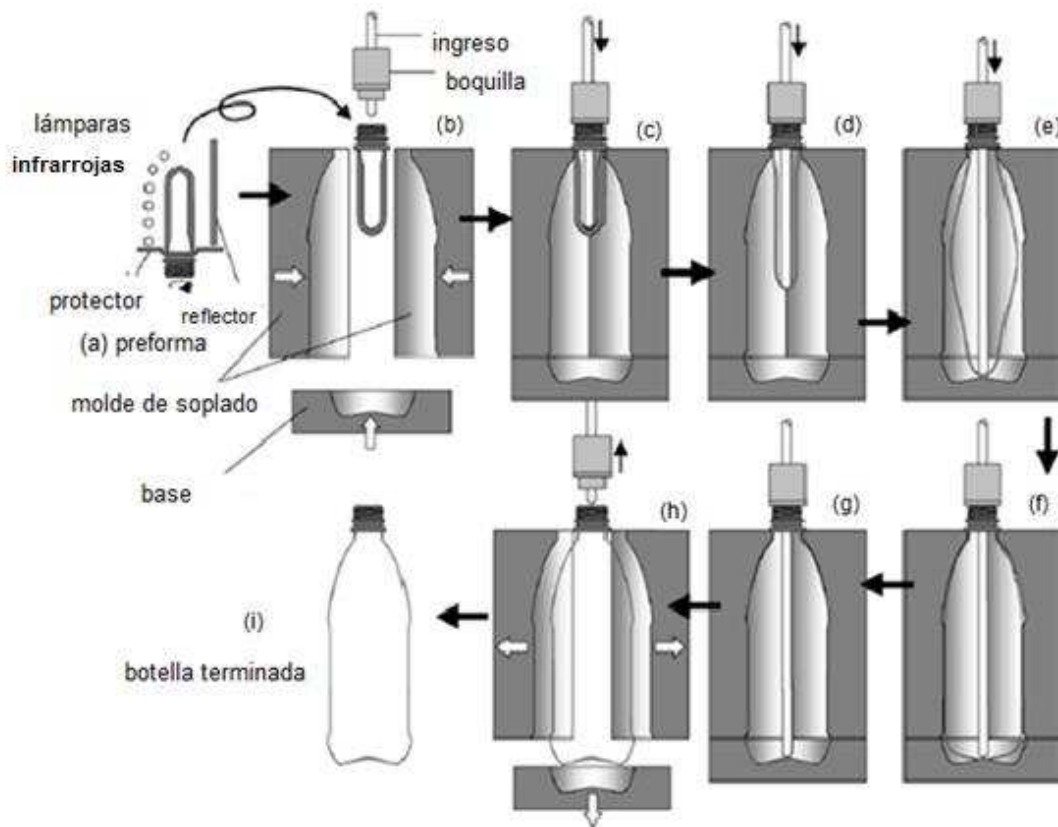


Figura 1.14. Fases para el procesamiento de botellas a base de PLA.<sup>31</sup>

Dentro del ISBM cuando la preforma ha alcanzado la temperatura óptima, se realiza el soplado del material. La boquilla de soplado se baja para sellar la preforma final, mientras que la varilla de estirado viaja hacia la preforma, a una velocidad típica de 1,0 a 1,5 m/s, y estira la preforma a la taza de la base (-e). Durante la fase de pre- soplado (Figura 1.14 -d), se admite aire comprimido de 0,5

<sup>31</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:205.

a 2,0 MPa a través de la boquilla de soplado para inflar parcialmente la preforma para evitar que la barra toque el material durante el estiramiento axial. Cuando la barra de estiramiento llega a la base de la copa y los pernos de la preforma a la base del molde, la presión de aire se eleva hasta 3,8 - 4,0 MPa para inflar totalmente la preforma. Esto obliga a la preforma a tomar la forma del molde de soplado y de los detalles superficiales de las botellas (Figura 1.14-f y g). La presión de soplado de alta se mantiene durante varios segundos para permitir el enfriado de la botella antes de la descarga. Este proceso se conoce como “proceso de dos etapas”. Por el contrario, el proceso de una etapa implica la inyección y soplado de la preforma en la misma máquina equipada con dos unidades: una de moldeo por inyección y otra de soplado.

Diferentes ajustes de potencia se aplican generalmente a los rayos infrarrojos calentadores para dar un óptimo perfil de temperatura para el estiramiento y dar la preforma en la botella con una distribución uniforme del espesor de la pared. Con frecuencia, los aditivos de recalentamiento, como el carbón dispersado en forma de líquido, se agregan a la resina en la extrusora para aumentar su absorción de energía infrarroja. Las preformas de PLA tienen una tendencia a contraerse después de recalentamiento, especialmente en las regiones cercanas al cuello y la tapa en el moldeo por inyección, además en estos sectores los esfuerzos residuales son los más elevados. Estos daños puede ser moderados a través del diseño de preformas adecuadas, con regiones de transición gradual. En la Figura 1.15 se presentan un diagrama de los cambios térmicos que sufre el PLA en el procesamiento de dos etapas, tomando en cuenta las temperaturas de procesamiento. De acuerdo al diagrama , primero se secan los pellets de PLA para a continuación calentarlos hasta la fusión y llegar a la temperatura de procesamiento. A continuación se enfría el material hasta conseguir la preforma. Una vez alcanzada la preforma se realiza un recalentamiento y luego realizar el soplado para conseguir la forma final. Finalmente, esta forma se enfría hasta obtener el producto.

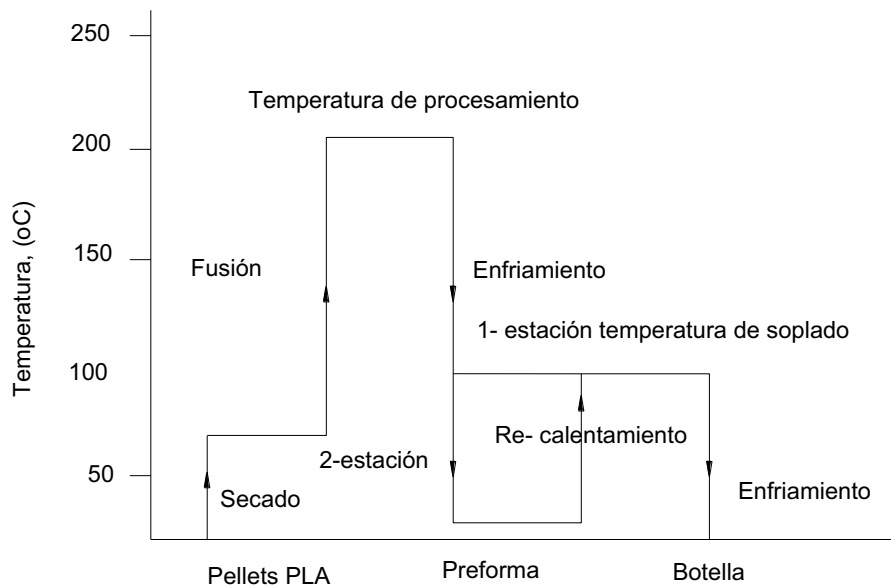


Figura 1.15. Fases de un procesamiento ISBM de PLA.<sup>32</sup>

La temperatura del moldeo por soplado para el PLA normalmente se establece en torno a los 35°C. Debido a que la base de la botella tiende a ser bastante gruesa, el calor residual puede causar que la base se estire después que la botella es expulsada del molde de soplado. Este problema se puede superar mediante la incorporación de costillas radiales para reforzar la base.

Al igual que en el caso del PET, el PLA exhibe endurecimiento cuando se estira con grandes esfuerzos. Este fenómeno de auto-nivelación es conveniente para el moldeo por soplado de las preformas para lograr un funcionamiento óptimo de las paredes ya que se minimiza la variación del espesor en las diferentes zonas de la botella. El endurecimiento por deformación se produce solamente cuando el PLA se estira más allá de su relación de estiramiento natural. Por lo tanto, la preforma se debe diseñar tomando en cuenta el tamaño de la botella final y su forma, de tal manera que las relaciones de estiramiento óptimo se realicen en el proceso de soplado. Preformas que no son completamente estiradas sufrirán un excesivo cambio de espesor en sus zonas, resultado botellas con una variación excesiva de espesor de pared con presencia de fugas y con un acabado estético pobre.

<sup>32</sup> CINK,K;BOPP , R.C; SIKKEMA ,K; Injection stretch blow molding process using polylactide resins; WO Patent 2006/002409; 2006.

Por el contrario, botellas sobrecargadas pueden dar como resultado esfuerzos que permiten la formación de microfisuras en la superficie de la botella. Normalmente el PLA comercial permite relaciones de estiramiento axial de 2,8 a 3,2 y radios transversales de 2 a 3. Los diseños de las preforma suelen ser de propiedad intelectual de las empresas, por lo tanto hay una falta de información en la literatura acerca de este tema. Un diseño óptimo de preformas debe cumplir con el mínimo requerido de extensión dependiendo de la relación de estiramiento natural, mediante la variación de la forma, diámetro, longitud, mezcla de radio, para cumplir con el requisito de peso de la pieza.

#### **1.2.4.4. Moldeo de película y laminado (“film and sheet”)**

El PLA con porcentajes de 92 a 98% en contenido de L-láctida ha sido calentado con éxito utilizando extrusoras convencionales. La producción de PLA bajo el proceso de “film and sheet” es prácticamente idéntica en sus fases iniciales al proceso de inyección donde la principal diferencia entre ellos es la rigidez y flexibilidad de los productos obtenidos debido a la diferencia en los espesores. Por lo general, las películas son de espesores  $\leq 0,076$  mm de espesor, las cuales se utilizan para el empaquetamiento de productos agrícolas, mientras que las hojas suelen ser de espesores  $\geq 0,25$  mm. En este proceso, el cual se encuentra representado en la Figura 1.16, el moldeo del PLA se logra a través de una matriz la cual se conduce por unos rodillos de cromo pulidos que son enfriados con circulación de agua. A su vez, este proceso puede ser mejorado con una pila de tres rodillos. Debido a la baja resistencia a la fusión del PLA, la orientación horizontal de la pila es la configuración preferida. Para evitar la condensación de monómeros láctico y el deslizamiento en los rodillos, se suelen utilizar temperaturas en los rodillos de 25 a 50°C. Sin embargo, temperaturas extremadamente altas deben ser evitadas ya que la membrana se adherirá a los rodillos, lo que produce láminas de mala calidad.

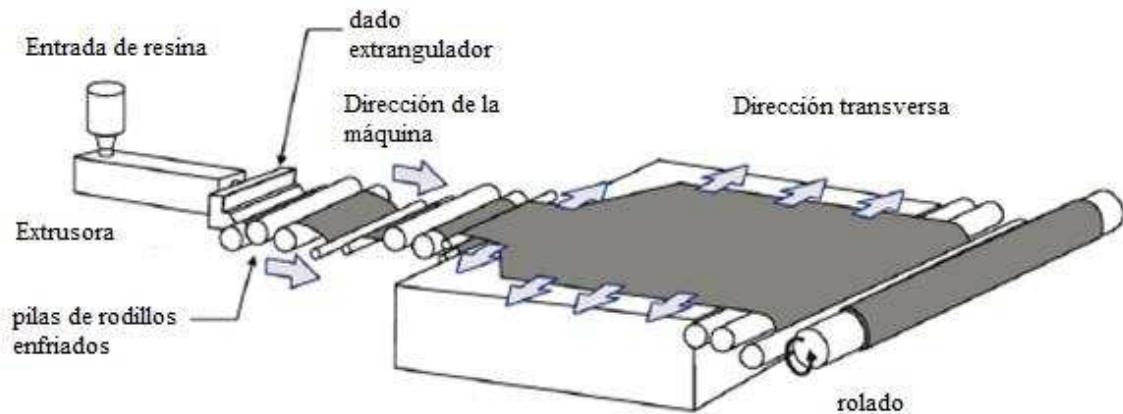


Figura 1.16. Moldeo de película y laminado.<sup>33</sup>

#### 1.2.4.5. Soplado de película

La extrusión de película soplada es el método más común para hacer películas de plástico, sobre todo para la industria del embalaje. El proceso de extrusión y soplado, que se presenta en la Figura 1.17, consiste en llevar el polímero a un tubo de fundición o extrusora para fundir el material; posteriormente el material fundido es evacuado a través de un dado, donde mediante la acción de aire comprimido el material fundido es inflado varias veces el diámetro inicial del dado, con la finalidad de formar una burbuja de película fina. Cuando el diámetro supera cierto valor, esta burbuja colapsa y se forma una capa delgada utilizable. Por lo general, la extrusión de película soplada se lleva a cabo verticalmente hacia arriba.

De manera más específica el proceso inicia cuando el material entra a la extrusora en forma de gránulos, que sucesivamente se compactan y se funden para formar un líquido viscoso continuo. El material fundido es transportado hacia una boquilla o dado anular. Seguidamente, el aire se inyecta a través de un agujero en el centro del dado, y la presión hace que el material extruido se expanda para formar una burbuja. El aire se ingresa en una tasa constante; por lo

<sup>33</sup> AIGNER,C; Oriented Films continue their successful run-even with PLA; Bioplastics Magazine Review; vol. 2; marzo-2007; p. 25.

tanto, la presión se mantiene constante permitiendo obtener un espesor regular en la burbuja. La burbuja se tira continuamente hacia arriba de la matriz y a través de un anillo de enfriamiento se sopla aire sobre la película. Con esto se logra mantener una temperatura adecuada en la película, en el interior de la burbuja y a su vez el diámetro necesario de la misma. Finalmente, se pasa al proceso de solidificación donde la película se mueve hacia un conjunto de rodillos guías que la conducen hacia unos rodillos de presión que logran el colapso de la burbuja y la generación de dos capas de película plana que a su vez serán el producto terminado. El proceso explicado anteriormente se observa en la Figura 1.17.

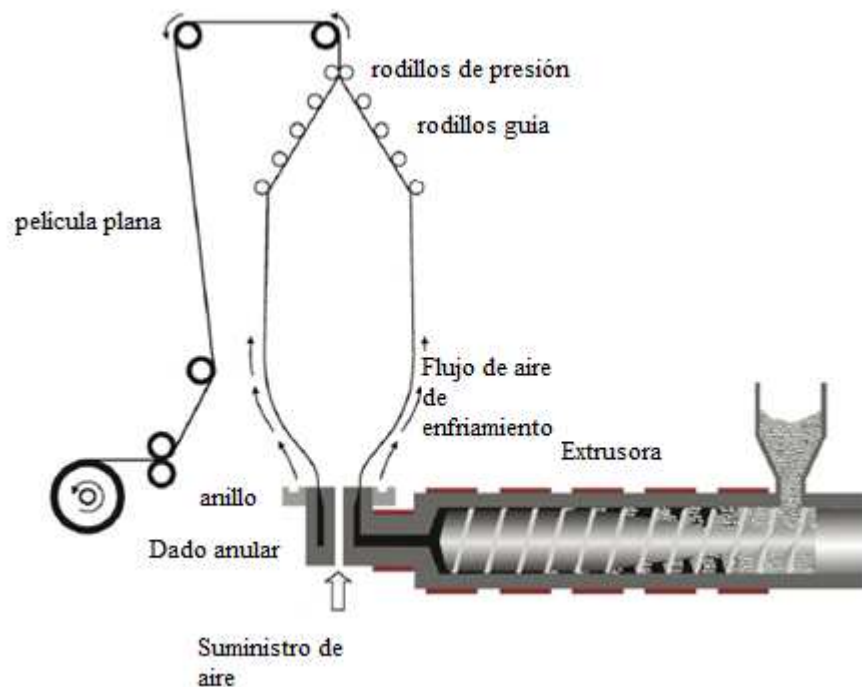


Figura 1.17. Proceso de moldeo por película soplada.<sup>34</sup>

#### 1.2.4.6. Termoformado

El termoformado es un proceso de transformación de plástico que involucra una lámina de plástico que es calentada y que toma la forma del molde sobre el que se coloca. Este proceso puede llevarse a cabo por medio de vacío, presión y temperatura. Las ventajas de esta técnica son la utilización de pocas

<sup>34</sup> OSSWALD, T; Polymer Processing Fundamentals, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, OH; 1998.



herramientas, bajo costo ingenieril y menor tiempo de procesamiento, lo que hace que el termoformado sea ideal para el desarrollo de prototipos con un bajo volumen de producción.

Las aplicaciones de los productos plásticos por termoformado incluyen: interiores automotrices, contenedores para empaque y transporte, equipo deportivo y recreacional, equipo médico, y más. Los materiales que se utilizan en el termoformado son numerosos y van a depender de la aplicación y las propiedades que se requieran. Por ejemplo, para los empaques flexibles, se utilizan el nylon o el polipropileno, que ofrecen una gran capacidad de formabilidad y rigidez. Para empaques semirígidos, se utiliza el PVC, poliéster y polipropileno. El EVOH ofrece una excelente barrera al oxígeno y la resina EVA ofrece un sellado a baja temperatura y buena adhesión.

#### **a. Formado mecánico molde macho-hembra<sup>35</sup>**

El moldeo macho-hembra es usado entre otras cosas, para el formado de piezas complicadas. En esta técnica de moldeo, una hoja calentada es formada entre dos moldes opuestos entre sí pero con contornos similares (macho-hembra). Cuando los moldes se unen entre sí, los contornos forzarán a la hoja a tomar la misma forma, entre el espacio creado entre los dos moldes. Cualquier protuberancia en el molde macho, mecánicamente forzará al plástico en la contraparte (molde hembra). Para una mediana o alta producción se utilizan equipos mecánicos para el cierre de los moldes; en otros casos el movimiento es producido por servomotores. Si ambos moldes, tienen una temperatura controlada, se puede lograr una reducción en el tiempo de enfriamiento.

Existen tres criterios básicos para tener un buen desempeño al aplicar la técnica del termoformado:

El primero consiste en que la fuerza aplicada, cualquiera que sea la fuente (neumática, hidráulica o mecánica) deberá tener la fuerza suficiente para inducir al plástico a deformarse, naturalmente una superficie muy grande o un molde muy

---

<sup>35</sup> Manual Técnico Termoformado; Empresa Plastiglas de México, S.A.; publicado marzo-2011.

intrincado requerirá una mayor fuerza. El segundo se refiere a una adecuada ventilación del aire atrapado. La presión que se ejerce entre los moldes provoca que entre éstos y la hoja quede aire atrapado que deberá ser removido para una buena configuración de la pieza. Esto se puede lograr barrenando uno o los dos moldes en las zonas donde se detecte la anomalía. Finalmente, el tercer criterio está en relación a la profundidad límite de estiramiento, que es el resultado de las fuerzas empleadas en el proceso. Es fácilmente comprensible que un estiramiento máximo solo tiene éxito cuando el molde tiene ángulos de salida mayores a los 5° y radios de curvatura muy grandes y suavizados, los ángulos muy cercanos a 90° pueden llegar a disminuir el estiramiento e inclusive rasgar el material plástico.

Este método sofisticado de termoformado no debe ser empleado en la totalidad de la configuración del molde, estando limitado su uso a solo algunas partes del molde. El formado mecánico molde macho-hembra no depende solamente de las fuerzas que se empleen; usualmente este tipo de formado puede ser combinado con vacío, aire a presión o las dos al mismo tiempo. Consecuentemente, el molde macho-hembra no tiene que coincidir exactamente, el molde macho podrá ser relativamente inferior en dimensiones y sustancialmente diferente en forma al molde hembra. Cuando están hechos de esta forma pueden actuar como "empujadores" en la hoja plástica. Este tipo de asistencia se denomina ayuda mecánica, porque presiona el material reblandecido en el molde hembra. El propósito de esta ayuda es el de preestirar el material para que la forma final sea lograda en combinación de vacío y/o presión de aire.

Usando ayudas mecánicas en el proceso, se tiene la ventaja de una mejor distribución del espesor del material, sobre cualquier otro proceso. Con la combinación de estas técnicas se puede obtener muchas variantes en el proceso. Dichas variantes pueden ser cambios en la presión de vacío, el tiempo de aplicación de vacío o presión, la velocidad de cierre de los moldes, o los ciclos de formado.

#### **b. Termoformado del PLA**

En el caso del termoformado del PLA primero se calientan las láminas para suavizar el polímero, seguidamente se utiliza fuerza mecánica para aprisionar al

material contra el molde, y dejarlo enfriar para posteriormente retirar el material del molde y finalmente cortar. El calentamiento del material para termoformado generalmente se logra mediante radiación infrarroja (IR) producida a partir de elementos calefactores. Cada polímero tiene una frecuencia óptima de radiación. Por lo tanto, el elemento calentador debe fijarse en la temperatura a la que la mayoría de la energía es absorbida por el polímero. El proceso de termoformado se presenta en la Figura 1.18.

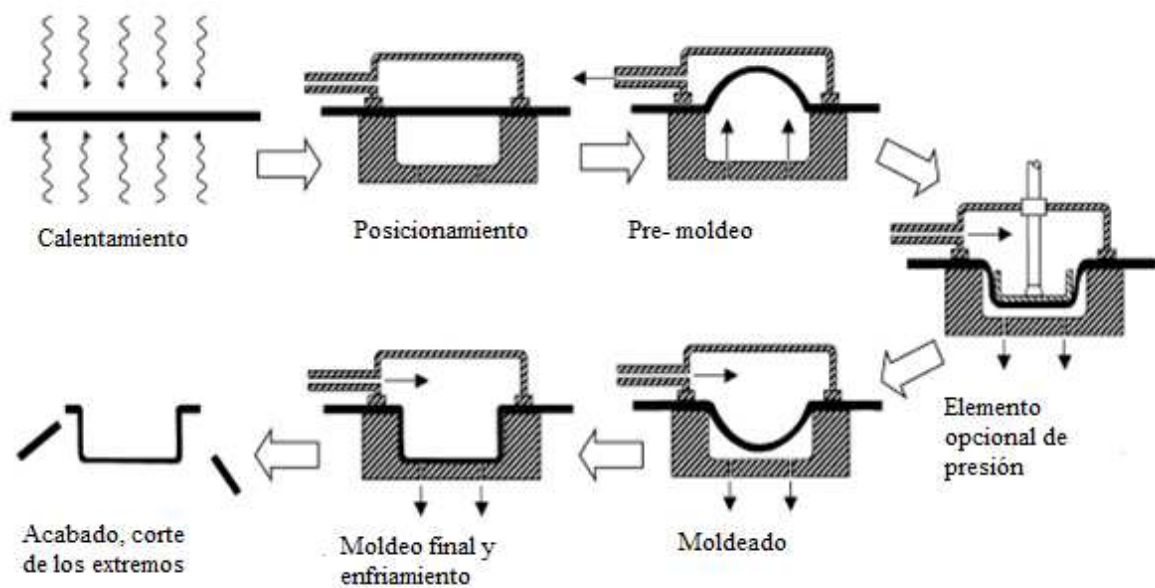


Figura 1.18. Etapas para el termoformado de PLA.<sup>36</sup>

Para el termoformado del PLA normalmente, se utilizan moldes de aluminio. Los moldes, herramientas de corte y los hornos diseñados para termoformado de PET y poliestireno de alto impacto (HIPS) pueden utilizarse para el moldeo de PLA. Para un espesor dado, los tiempos necesarios de refrigeración de los moldes de PLA tienden a ser más altos que los necesarios para enfriar el PET debido a la baja conductividad térmica y temperatura de transición vítrea del PLA. Como guía, el PLA no debe ser expuesto a temperaturas superiores a 40°C o con humedad relativa superior al 50%. Después del termoformado, se deben tomar precauciones para almacenar PLA por debajo de 40°C ya que pueden acelerar la descomposición.

<sup>36</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:208

### 1.2.5. APLICACIONES INDUSTRIALES DEL PLA<sup>37</sup>

El ácido poliláctico a lo largo de los años ha sido trabajado mediante diferentes procesos, tales como el moldeo por extrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado y otros métodos que han sido expuestos en el acápite 1.2.4 del presente estudio. En general, la utilización de PLA tiene un desarrollo de más de tres décadas atrás en la fabricación de implementos para aplicaciones médicas. Sin embargo, para el caso de aplicaciones más comerciales e ingenieriles su desarrollo ha sido menor, y solamente a partir de la década de los noventa se han iniciado investigaciones para generalizar el uso del PLA.

El PLA como polímero biodegradable ha sido ampliamente estudiado gracias a su característica biodegradable y porque presenta propiedades tanto químicas como mecánicas favorables frente a otros materiales de su tipo. Además, de la posibilidad de mejorar sus propiedades mediante la adición de aditivos, catalizadores, fibras y otros que permiten aumentar el campo de acción del mismo sin afectar su naturaleza biodegradable.

#### a. El PLA en la industria médica

Uno de los mayores desarrollos en aplicaciones del ácido poliláctico se ha dado en la industria médica gracias su naturaleza no tóxica, su durabilidad, su capacidad de esterilización y la más importante su compatibilidad. Esta compatibilidad se entiende como la capacidad del material para cumplir con su función de acuerdo a sus propiedades mecánicas sin afectar el medio en el que se encuentra. Por lo tanto, el PLA ha sido utilizado para generar un sinnúmero de aplicaciones que tienen un contacto directo con el cuerpo humano. Esto se debe a que el PLA no genera reacciones adversas y permite la regeneración de la zona afectada. Además, no se necesita de una cirugía para retirar el elemento, ya que al biodegradarse es absorbido por el cuerpo humano en su totalidad. En las Figuras 1.19 y 1.20 y en la Tabla 1.9 se muestran algunas de las aplicaciones médicas del ácido poliláctico.

---

<sup>37</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey; 2010.

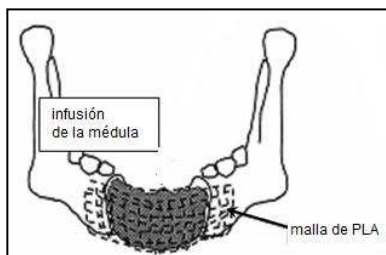


Figura 1.19. Malla a base de PLA para direccionamiento correcto del crecimiento de un hueso.

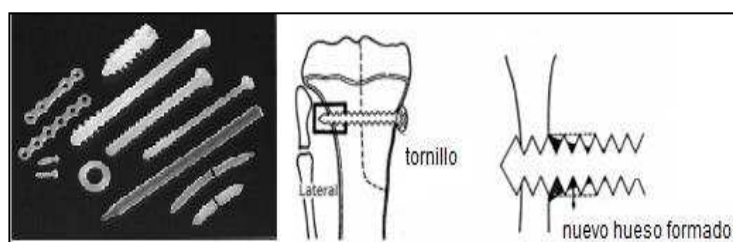


Figura 1.20. a) Elementos de fijación para unión de huesos fracturados. b) Esta figura muestra la formación del nuevo hueso mientras el tornillo a base de PLA se degrada.

Tabla 1.9. Productos y aplicaciones del PLA en la industria médica.<sup>38</sup>

Producto	Aplicación	Descripción
Fibras	Suturas	Utilizada en la sutura de cortes en el cuerpo
	Cánulas	Tratamiento de arterias reducidas o debilitadas en cirugías cardiovasculares
	Fieltros	Reconstrucción de tendones en la rodilla
Mallas	Membranas	Para el direccionamiento adecuado del crecimiento de un nuevo hueso
Dispositivos de fijación	Tornillos	Unión de huesos fracturados

<sup>38</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p.445-454.

## **b. El PLA en la industria del empaquetamiento**

Aplicaciones de PLA en la industria del empaquetamiento han sido desarrolladas y utilizadas en gran cantidad de productos alrededor del mundo; principalmente en la fabricación de películas protectoras de productos alimenticios como frutas y vegetales. Estas películas de PLA son utilizadas gracias a que el material presenta buenas características de resistencia a la tracción, resistencia al impacto y elongación manteniendo una transparencia aceptable. Además los microorganismos no crecen fácilmente sobre la superficie del material y colorantes y aromas no se difunden fácilmente desde los alimentos hacia el polímero. En general el PLA presenta mejores características de barrera que el polietileno para protección de los productos.

A continuación se nombrarán algunos polímeros fabricados por la casa comercial NatureWorks LLC . Todos ellos son diferentes tipos de PLA y su denominación depende del tipo de procesamiento con el cual deben ser trabajados. El polímero 4041D es una resina para procesarlo mediante soplado de película y producir filmes para fines generales. Está orientado biaxialmente lo cual le confiere unas características de estabilidad frente a altas temperaturas (hasta 130°C). El polímero 4031D es también una película orientada biaxialmente para usos a elevadas temperaturas (hasta 150°C). Estos dos tipos de PLA el 4041D y 4031D ofrecen características ópticas excelentes, fácil procesado y características excelentes frente a la torsión. El polímero 1100D es una resina termoplástica obtenida por extrusión convencional a temperaturas inferiores a las del PE. Los usos potenciales del PLA 1100D incluyen: bolsos, tazas, placas de la comida campestre, empaquetado de verduras congeladas, recipientes de alimentos líquidos, etc. El polímero 2000D es una resina termoplástica diseñada para ser sometida a procesos de extrusión y termoconformado. Asimismo, el ácido poli L-láctico con bajo grado de polimerización puede ser utilizado en películas biodegradables para usos agrícolas.

## **c. El PLA en la industria textil**

Desde mediados del siglo XX los materiales textiles han sido elaborados a base de polímeros sintéticos, tales como nylon y poliéster. La principal ventaja para la

utilización de estos polímeros en esta industria ha sido su durabilidad, la que a su vez es su principal desventaja por contribuir con la crisis mundial en el manejo de desechos sólidos. Por lo tanto se han realizado esfuerzos para aplicar nuevos materiales capaces de biodegradarse naturalmente con la finalidad de evitar que al momento de la incineración de los desechos se produzca gases de efecto invernadero. Dentro de las posibles alternativas el PLA ha sido un estandarte en la obtención de nuevas fibras textiles debido a sus características biodegradables, bacteriostáticas, no inflamables y su resistencia a los cambios de clima.

Las fibras de PLA se mantienen estables cuando es almacenado en condiciones a temperatura ambiente. Sin embargo, cuando el material es expuesto a temperaturas mayores a 60°C y una humedad relativa mayor al 80% el PLA se desintegra en un periodo de una semana a un mes, seguido por un ataque bacterial que produce dióxido de carbono y agua. En la primera fase de biodegradación el PLA sufre un proceso químico de hidrólisis que depende tanto de la temperatura como la humedad y no envuelve la presencia de microorganismos. Cuando el peso molecular de las partículas alcanza aproximadamente 10.000 a 20.000 microorganismos presentes empieza la digestión de las moléculas de bajo peso molecular, como es el ácido láctico produciendo dióxido de carbono y agua.

Con respecto al manejo de la humedad las fibras de PLA son normalmente hidrofóbicas, pero más hidrofílicas que las fibras de PET y otros polímeros comunes. Por lo tanto, estas pueden ser utilizadas de mejor manera en la combinación con otras fibras naturales y lograr más aplicaciones. Prendas elaboradas a partir de PLA han mostrado ser más confortables para la fabricación de camisetas deportivas, debido a su capacidad de absorción de humedad. Esto se debe a que el PLA tiene la capacidad de absorber más rápidamente el agua y además eliminarla con un proceso de secado más rápido en comparación a lo que se produce en el PET.

Otras propiedades importantes para la generación de aplicaciones textiles pueden ser enunciadas. Debido a que el ácido láctico es un ácido orgánico exhibe propiedades antibacteriales. Además las fibras de PLA poseen características auto extintoras a pesar de no ser un material de baja flamabilidad. Con respecto a

su comportamiento a condiciones ambientales las fibras de PLA presentan una mayor resistencia a la exposición a rayos UV lo que lo hace atractivo para aplicaciones en agricultura, horticultura y áreas industriales.

Las ventajas de utilizar fibras a base de PLA incluyen:

- Bajo peso específico comparado con otras fibras naturales, lo que implica productos más ligeros. Una tenacidad más alta o lo que es lo mismo una fuerza extensible mayor que las fibras naturales. Recuperación de la humedad perceptiblemente más baja con lo que se obtiene un secado rápido.
- Resistencia UV excepcional comparado con otras fibras. Índice de refracción bajo, lo cual genera intensos colores una vez teñidas las fibras de PLA.
- Comparado con el PET y otros sintéticos, tienen un bajo poder calorífico, pero generan menor cantidad de humos al quemarse.




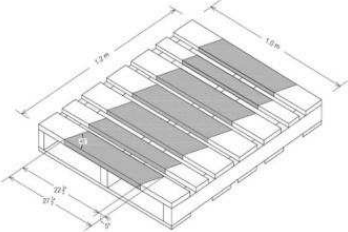

Entre las desventajas de utilizar fibras elaboradas a base de PLA en la industria textil tenemos: baja resistencia a compuestos alcalinos, causando pérdida de fuerza en los procesos convencionales de dispersión por teñido. Resiste temperaturas de planchado bajas puesto que presenta una temperatura cristalinidad baja.

#### **d. Aplicaciones especiales del PLA**

En algunos países, tanto asiáticos como europeos, actualmente se encuentran utilizando el PLA en aplicaciones de naturaleza diferente a las expuestas anteriormente. En la Tabla 1.10 se presentan algunos de los productos, a base de PLA, que ciertas empresas se encuentran distribuyendo alrededor del mundo con el sello de amigables para el ambiente.




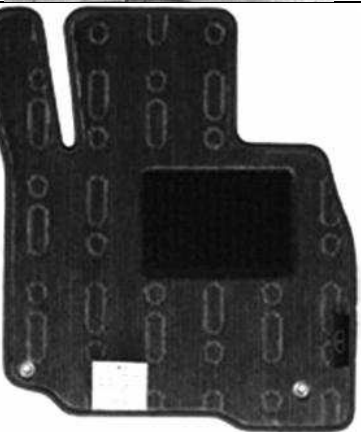
Tabla 1.10. Aplicaciones del PLA en la actualidad.<sup>39</sup>

Producto	Fabricante/País de origen	Imagen
DVD cases	Yao Qing Biotechnology Co., Ltd./TAIWAN	
Cartucheras para lápices	Yao Qing Biotechnology Co., Ltd./TAIWAN	
Cases para computadoras portátiles	Yao Qing Biotechnology Co., Ltd./TAIWAN	
Pallets para transporte y almacenado de productos	Patente USA	
Recipientes contenedores de productos comestibles	Ecotainer	

En la Tabla 1.11 se muestran algunas aplicaciones especiales que han sido desarrolladas utilizando PLA en diferentes industrias.

<sup>39</sup> [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/medicina/polimeros\\_biodegradables.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/medicina/polimeros_biodegradables.htm)

Tabla 1.11. Aplicaciones especiales del PLA.

Producto	Industria	Descripción	Aplicación comercial
Recipientes	Productos agrícolas	Conservación de productos vegetales y frutas.	
Cases para equipos electrónicos	Eléctrica- Electrónica	Protección de circuitos electrónicos en reproductores, PCs, teléfonos celulares, controles, etc	
Protectores de llanta	Automotriz	Protección de llantas de emergencia en automóviles	
Moquetas	Automotriz	Protección y reposo de los pies del ocupante en la base del automóvil	
Telas para asientos, cojines, telas para techo, paneles de puerta, partes del tablero principal.	Automotriz	Componentes trabajados anteriormente a base de polímeros sintéticos	

### 1.3. COMPUESTOS BIODEGRADABLES<sup>40</sup>

Los materiales compuestos son atractivos porque combinan propiedades de diferentes materiales en formas que no son encontradas en la naturaleza. Estos materiales generalmente resultan en compuestos de baja densidad, alta rigidez y propiedades específicas para diferentes aplicaciones. El refuerzo de materiales plásticos con fibras empezó en 1908 con fibra celulosa después extendiéndose hacia la úrea y melanina, logrando un importante espacio en la industria con el uso de fibra de vidrio en poliésteres no saturados para 1940. Entre algunos ejemplos de aplicaciones de estos materiales se tiene la estructura de guitarras, raquetas de tenis, partes de aviones, por ejemplo, más del 50% de las partes del Boeing 787 son elaborados con materiales compuestos disminuyendo el uso de aluminio. Además, el epoxi reforzado con fibra de vidrio es un material ideal utilizado en tanques y tuberías del sector petrolero. De igual manera, en la industria automotriz se utilizan en elementos de frenos, partes del tablero principal, ruedas y chasis.

El mercado de los compuestos reforzados por fibra es un negocio multimillonario donde la fibra de vidrio es la dominante y usada en un 95% de los casos para reforzar termoplásticos y termoestables. Sin embargo, en ciertos estudios se encontró que en algunas aplicaciones el uso de fibras naturales genera compuestos competitivos con los de fibra de vidrio. Por lo tanto, a partir de este descubrimiento se generaron dos nuevos conceptos: (i) biocompuestos los cuales están formados de fibra natural y polímeros derivados de petróleo no degradables y (ii) los compuestos verdes o “green composites” donde tanto la matriz como los refuerzos son biodegradables.

#### 1.3.1. FIBRAS NATURALES

Los recursos naturales en el planeta se encuentran disminuyendo aspecto que aumenta la demanda de materiales sustentables y renovables. Para 1997,

---

<sup>40</sup> MOHANTY, A; MISRA, M; DRZAL, L; Natural fibers, biopolymers, and biocomposites; Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.

aproximadamente 25 millones de toneladas métricas de fibra elaborada por el hombre y cerca de 20 millones de toneladas métricas de fibras naturales fueron producidas. Los refuerzos de biofibras representan una no tradicional y bien valorada fuente de ingresos para la comunidad de agricultores. El yute proviene de India y Bangladesh, la estopa de coco es producida en zonas tropicales del planeta, siendo India el mayor productor con el 20% de la producción total en el mundo. El sisal es también producido en países tropicales de África, Indias occidentales, siendo Tanzania y Brasil los dos mayores productores. El kenaf es cultivado especialmente en Estados Unidos; el lino crece en la Unión Europea en diversos sistemas agrícolas y ambientes alrededor del mundo incluyendo Canadá, Argentina, India y Rusia. El cáñamo tiene su origen en Asia central, pero ahora es cultivado en varios países con un clima templado. Las fibras de ramio son las fibras textiles más largas y resistentes y son usadas en China, Japón y Malasia.

El Ecuador se presenta como el segundo productor mundial de fibra de abacá después de Filipinas, con una producción anual aproximada de 10.000 toneladas. En lo referente a la producción de cabuya, en el año 2008 se produjeron cerca de 5.400 toneladas que generaron aproximadamente USD 2,7 millones, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). En el país hay 2.348 Ha del cultivo: en Imbabura (51%), Carchi (47%) y otras provincias de la Sierra (2%). El coco se cultiva en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Napo, Orellana y Galápagos, aunque no se tienen datos actuales, en el 2.006 la producción anual aproximada sumó 51.000 TM. De acuerdo a la última investigación realizada por el MAGAP, Esmeraldas es la provincia con mayor producción de fibra de coco.<sup>41</sup>

Por otra parte, muchos plásticos por sí mismos no son adecuados para aplicaciones con soporte de cargas debido a sus deficiencias en resistencia, rigidez y estabilidad dimensional. Sin embargo, las fibras poseen alta resistencia y rigidez pero difícilmente son utilizadas en aplicaciones con soporte de carga debido a su estructura. Es así, que en compuestos con refuerzos de fibra, las

---

<sup>41</sup> Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) Direcciones Provinciales and 2006 Agencias de Servicio Agropecuario, Balance de Alimentos.

fibras funcionan dando resistencia y rigidez a la estructura mientras que la matriz de plástico sirve como adherente para mantener las fibras en posición. En la Figura 1.21 se presenta una clasificación de las fibras naturales más utilizadas en biocompuestos.

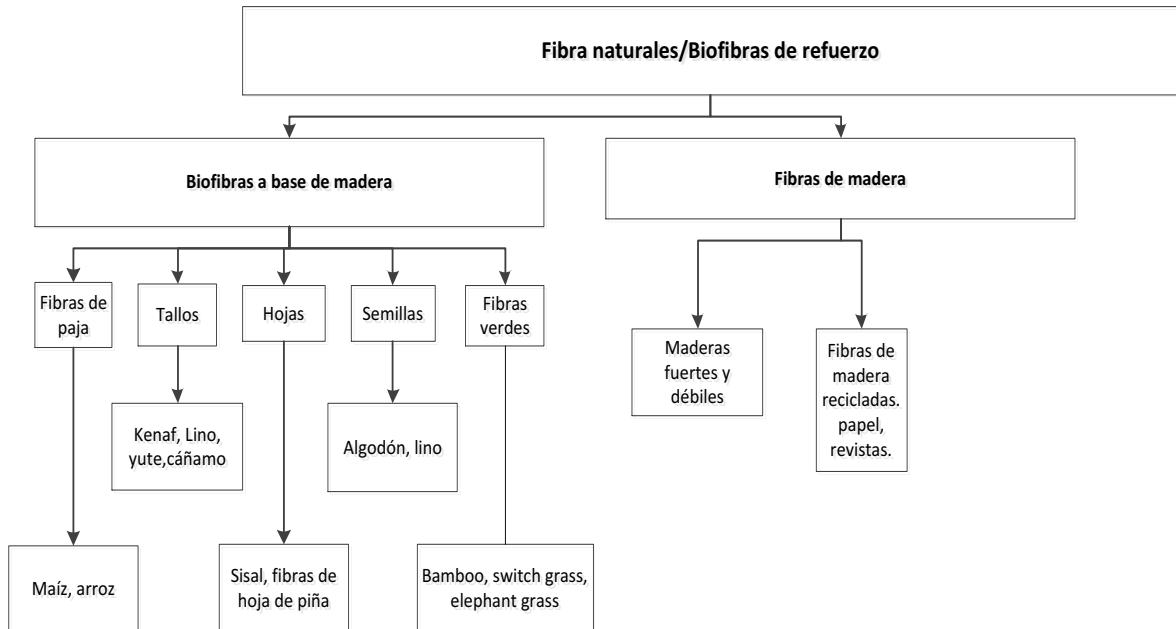


Figura 1.21. Representación esquemática de las fibras naturales más utilizadas.

Las fibras naturales de origen vegetal son fibras materiales que se producen como resultado de la fotosíntesis. Estas fibras normalmente se refieren a vegetales, biomasa, fotomasa, agromasa, solarmasa o fibras fotosintéticas. Otro término utilizado para nombrarlas es el de fibras lignocelulósicas, ya que contienen tanto lignina como celulosa.

En términos de utilización, existen dos clasificaciones generales de las plantas de producción de fibras naturales: primarias y secundarias. Las plantas primarias son aquellas cultivadas por su contenido de fibra, mientras que las plantas secundarias son aquellas en las que las fibras vienen como un subproducto de la utilización de ciertas plantas primarias. Yute, cáñamo, kenaf, el sisal y el algodón son ejemplos de plantas primarias, mientras que los tallos de piña, cereales, agave, palma de aceite, banano y de coco son algunos ejemplos de plantas secundarias. En la Tabla 1.12 se muestra un inventario de algunas de las fibras que más se producen en el mundo. De acuerdo con la fuente, los datos que se

muestran son solo valores aproximados obtenidos a partir de estimaciones y extrapolaciones.

Tabla 1.12. Producción aproximada en toneladas de fibra en el mundo.<sup>42</sup>

Fuente de fibra	Toneladas producidas
Madera	1 .750.000.000
PAJA (trigo, arroz, avena, cebada, centeno, lino, hierba)	1.145 .000.000
Tallos	970.000.000
Bagazo de caña de azúcar	75.000.000
Cañas	30.000.000
Bambú	30.000.000
Fibra de algodón	15 000.000
Núcleo (yute, kenaf, cáñamo)	8 000 000
Papiro	5 000 000
Esparto	500 000
Hoja (sisal, abacá, henequén)	480 000

En la Tabla 1.13 se presentan las condiciones climáticas necesarias para el crecimiento de las plantas primarias para la obtención de fibra natural:

Tabla 1.13. Condiciones para el crecimiento de fibra.<sup>21</sup>

Fibra	Temperatura óptima (°C)	Humedad mínima	Propiedad óptima del suelo PH	Ciclo de crecimiento (días)	Rendimiento (kg/hectárea)
Lino	10-20	150	5,5-7,0	85-120	1100
Ramio	20-30	140	5,4-6,4	45-60	550
Yute	18-33	250	6,6-7,0	120-150	2200
Kenaf	22-30	120	6,0-6,8	150-180	1700
Roselle	25-30	150	5,2-6,4	150-180	2600
Ureña	21-27	160	-7	120-180	2200
Cáñamo	18-33	-	-	90-120	3610
Sisal	25-30	120	-7	(12-15 años)	3360
Algodón	21-25	175	5,2-7,0	180-200	790
Abacá	25-29	200	5,2-6,4	7-8 años	3000

<sup>42</sup> PICKERING, KIM; Properties and performance of natural-fiber composites; Woodhead Publishing Limited; Cambridge- England; 2008.

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos en la adición de fibras naturales en diferentes matrices poliméricas. Cabe indicar que estos resultados se presentan para mostrar el efecto de aumentar o disminuir el tamaño de fibra, aumentar o disminuir la cantidad de fibra, de colocar diferentes orientaciones de fibra, para utilizarlos como valores solamente referenciales en la elaboración de los materiales del presente proyecto. Esto se debe a que la naturaleza de las matrices es completamente diferente a la de un polímero biodegradable.

La mayoría de los datos se generaron en algunos proyectos de titulación de la Facultad de Ingeniería Mecánica, cuyos valores se encuentran recopilados en el libro “Nuevos Materiales: aplicaciones estructurales e industriales” publicado por GUERRERO, V y otros autores.

En la Figura 1.22 y más claramente en la Tabla 1.14, se muestran los valores de resistencia a la tracción respecto a la fracción volumétrica y la orientación de la fibra en materiales compuestos de matriz de resina poliéster reforzados con abacá.

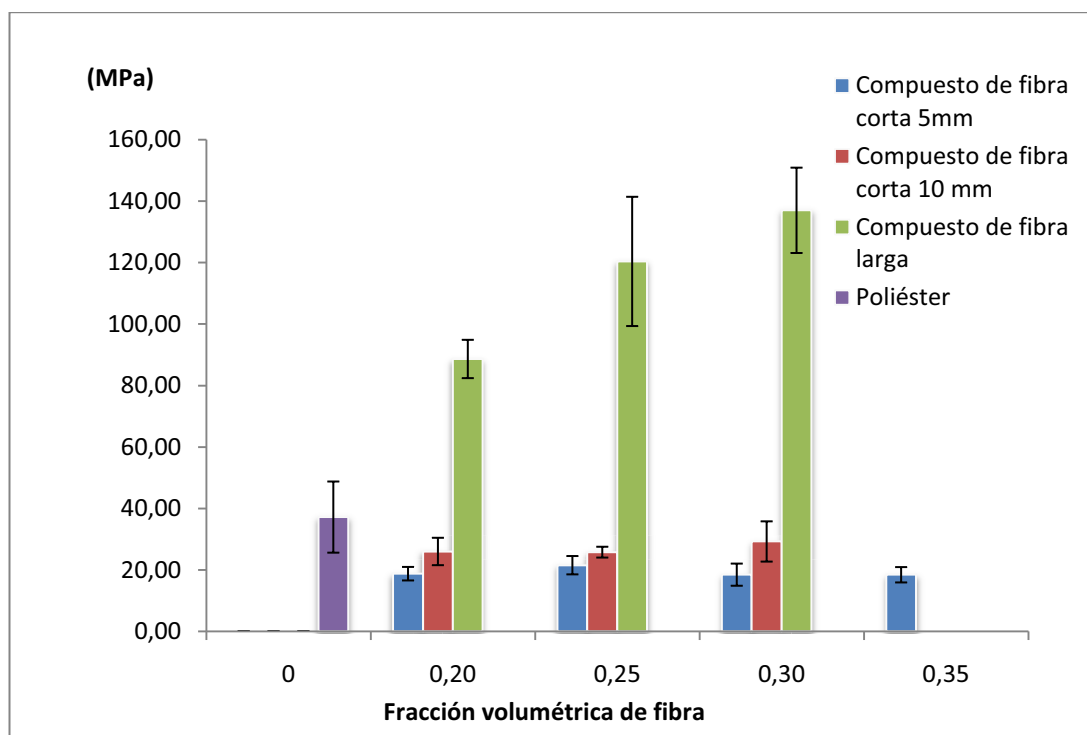


Figura 1.22. Resistencia máxima a la tracción de compuestos poliéster-abacá.<sup>43</sup>

Tabla 1.14. Tabla resumen de las propiedades mecánicas de compuestos de poliéster reforzado con fibras de abacá presentadas en la Figura 1.22.

Tipo de material	Fibra de refuerzo	Resistencia máxima a la tracción (MPa)
Poliéster	---	37,17
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 30 vol%	abacá	29,24
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 25vol%	abacá	25,76
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 35 vol%	abacá	136,95
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 25 vol%	abacá	120,34

De acuerdo a los autores los compuestos elaborados con fibra corta de abacá presentaron problemas de adhesión entre la matriz y el refuerzo. Al parecer no existió un adecuado anclaje de la fibra corta en la matriz, lo cual pudo provocar la presencia de discontinuidades a lo largo del material y que los esfuerzos no se distribuyeran de forma homogénea en el área transversal de la probeta, fallando el material a cargas menores que en el caso de la resina poliéster. Sin embargo, para el caso de materiales elaborados con fibra continua hubo un incremento considerable de la resistencia a la tracción, debido a que los esfuerzo se distribuían de manera más homogénea a la largo de las fibras por su orientación. Además, para estos materiales mientras más se aumentaba la fracción

<sup>43</sup> GUERRERO, V; et al; Nuevos Materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Escuela Politécnica Nacional; Imprefep; Quito-Ecuador, 2011.



volumétrica de fibra en la matriz sus propiedades se incrementaban hasta un límite, donde las propiedades comenzaban a bajar por exceso de fibra añadida. En este caso la fracción máxima fue de 0,35 vol%.

En la Figura 1.23 y más claramente en la Tabla 1.15, se muestran los valores de resistencia máxima a la flexión respecto a la fracción volumétrica y la orientación de la fibra en materiales compuestos de matriz de resina poliéster reforzados con abacá.

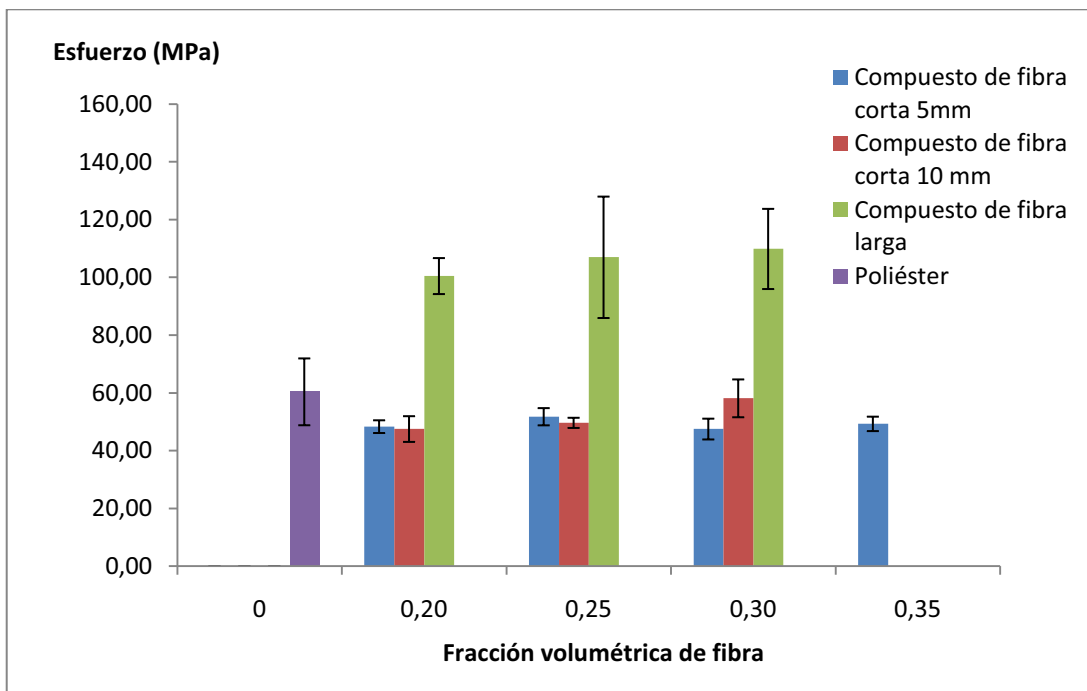


Figura 1.23. Resistencia máxima a la flexión de compuestos poliéster-abacá.<sup>44</sup>

Tabla 1.15. Tabla resumen de las propiedades mecánicas de compuestos de poliéster reforzado con fibras de abacá presentadas en la Figura 1.23.

<sup>44</sup> GUERRERO, V; et al; Nuevos Materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Escuela Politécnica Nacional; Imprefepp; Quito-Ecuador, 2011.

Tipo de material	Fibra de refuerzo	Resistencia máxima a la flexión (MPa)
Poliéster	---	60,41
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 30 vol%	abacá	47,52
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 25vol%	abacá	51,80
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 35 vol%	abacá	109,89
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 25 vol%	abacá	107,00

De acuerdo a los autores hubo un aumento significativo del esfuerzo máximo a la flexión para los materiales compuestos reforzados con fibra continua de abacá en relación al de la matriz poliéster, en un rango del 67 al 82%. Esto podría explicarse al tomar en cuenta la distribución longitudinal de las fibras en el material. Las fibras en este arreglo absorberían parte de la carga, minimizando el efecto que la fuerza aplicada tendría en la matriz. Igualmente la adición de fibra corta de 10mm presentó una disminución en la resistencia máxima a la flexión frente a la matriz.

En la Tabla 1.16 se muestran valores del incremento de las propiedades a tracción para materiales de resina poliéster reforzado con fibra de cabuya. Es importante señalar que existen materiales con diferentes fracciones volumétricas de fibra y diferentes orientaciones de ésta.

Tabla 1.16. Incremento de las propiedades a tracción de materiales de resina poliéster reforzados con cabuya.<sup>45</sup>

Fracción volumétrica	Orientación de la fibra	Esfuerzo máxima (MPa)	Incremento respecto a la matriz	Módulo de elasticidad (MPa)	Incremento respecto a la matriz
34%	Continua unidireccional	55,66	94,18%	2540,52	70,23%
23%	Continua unidireccional	74,32	159,26%	4025,60	169,74%
28%	Tejido a 45°	49,38	72,25%	2978,72	99,59%
34%	Tejido a 45°	50,78	77,13%	3396,62	127,59%
28%	Tejido a 0°	56,14	95,84%	4080,78	173,43%
34%	Tejido a 0°	62,00	116,29%	5305,30	255,48%
Resina	Tejido a 0°	28,67	0,00%	1492,42	0,00%

De acuerdo al autor los materiales reforzados con fibra continua unidireccional presentan las mejores propiedades tanto a tracción como flexión. Lo importante también de este estudio es que se adicionan tejidos de cabuya a 0 y 45°, siendo el tejido a 0° el mejor. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que elaborar un tejido representa mayor trabajo y gasto para el fabricante del compuesto. Por lo tanto, utilizar este tipo orientaciones encarece al producto. Igualmente mientras se aumentaba la fracción de fibra en la matriz poliéster las propiedades aumentaban hasta un límite donde las propiedades empezaban a disminuir. En este caso el valor máximo fue 34%.

En la Tabla 1.17 se muestran valores del incremento de las propiedades a tracción para materiales de polipropileno reforzado con fibra de abacá. Es importante señalar que existen materiales con diferentes fracciones volumétricas de fibra y diferentes orientaciones de ésta. Además, los resultados de este estudio pueden entregar una mejor idea del comportamiento de la fibra en materiales termoplásticos como lo es el polipropileno y el PLA.

Tabla 1.17. Propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá.<sup>46</sup>

<sup>45</sup>TAMAYO, A; Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras de cabuya; Laboratorio de Nuevos Materiales; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador, Noviembre; 2011.

Tipo de material	Fibra 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)
Polipropileno	---	31,62	548,65	37,50	1.249,60
Compuesto de fibra corta de 30 mm, 35 vol%	abacá	37,30	1.277,80	52,33	1.952,00
Compuesto de fibra corta de 20 mm, 35 vol%	abacá	38,45	1.110,00	51,70	1.989,00
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 35 vol%	abacá	87,44	2.400	124,36	5.175,00

De acuerdo al autor, a diferencia de lo sucedido en la resina poliéster, los compuestos elaborados con fibra corta de abacá presentaron un incremento en las propiedades a tracción y flexión respecto a la matriz. Igualmente, sucedió para el caso de materiales elaborados con fibra continua, donde se lograron los mejores resultados. Además, para estos materiales mientras más se aumentaba la fracción volumétrica de fibra en la matriz sus propiedades se incrementaban hasta un límite, donde las propiedades comenzaban a bajar por exceso de fibra añadida. En este caso la fracción máxima fue de 0,35 vol%.

### 1.3.2. LA FIBRA DE ABACÁ

También llamada cáñamo de Manila, el abacá se extrae de la vaina de las hojas que rodean el tronco de la planta de abacá (*Musa textilis*), pariente cercana de la banana, nativa de Filipinas y ampliamente distribuida en los trópicos húmedos. El proceso de cosecha del abacá es laborioso. Cada tallo debe cortarse en tiras, las cuáles son raspadas para remover la pulpa. Luego las fibras se lavan y secan.

---

<sup>46</sup> MOSCOSO, 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 1.24. Fibras de abacá.

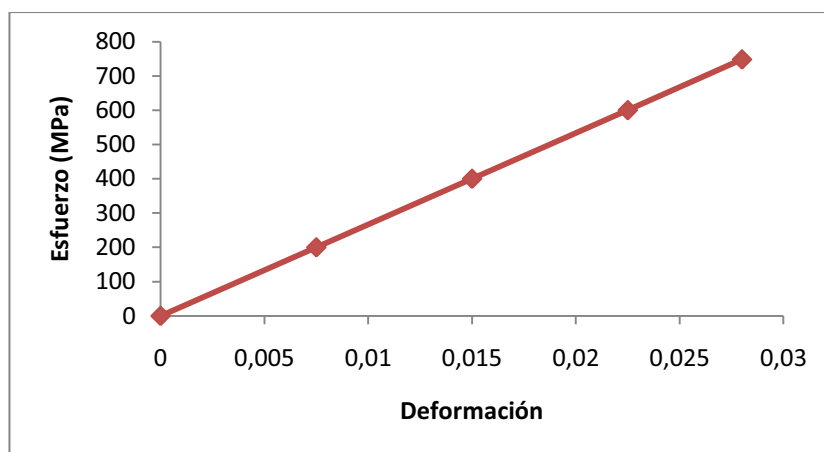
El abacá es una fibra de hoja, compuesta por células largas y delgadas que forman parte de la estructura de soporte de la hoja. Su contenido de lignina está por encima del 15%. El abacá es valorado por su gran resistencia mecánica, flotabilidad, resistencia al daño por agua salada, y por su alta relación longitud-diámetro, tomando en cuenta que puede llegar a medir hasta 6 metros. Las mejores clasificaciones del abacá son finas, brillantes, de un color habano claro y muy fuertes. Normalmente la composición química de la fibra de abacá tiene los siguientes valores: celulosa del 56 al 63%, lignina 15%, pentosano del 15 al 17% y cenizas del 3%.

Existe una gran cantidad de reportes científicos que presentan valores de las propiedades de las fibras, pero estos difieren unos de otros debido a que cada fibra exhibe diferentes resultados en cuanto a sus propiedades. Esto se debe a que cada fibra tiene diferente humedad, composición y diferentes métodos de procesamiento dependiendo de donde crezca. Sin embargo, como referencia en la Tabla 1.18 se presentan algunas de las propiedades de la fibra de abacá obtenidas en un estudio realizado en fibras cultivadas en Santo Domingo de los Tsáchilas.

Tabla 1.18. Propiedades de la fibra de abacá del sector de Santo domingo de los Tsáchilas.<sup>47</sup>

Fibra	Resistencia a la tracción		Módulo de elasticidad	
	(kg/mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(kg/mm <sup>2</sup> )	(MPa)
Fibra de abacá sin tratamiento	31,32	307,14	2018,15	19791,29

Además en la Figura 1.25 se muestra una curva esfuerzo vs. deformación obtenida para una fibra de abacá. Esta curva nos muestra la alta resistencia a la tracción de la fibra y la tendencia lineal de la curva.

Figura 1.25. Curvas esfuerzo vs. deformación de la fibra de abacá.<sup>48</sup>

Los mejores cultivos de esta planta se han obtenido en zonas con un clima tropical-húmedo, a temperaturas entre los 22 y 28°C, precipitación fluvial entre 1.800 y 2.500 mm/año, altitud menor a 600 m.s.n.m donde no existan vientos fuertes y donde el sol y la humedad se encuentren en equilibrio. Todas estas condiciones las cumple plenamente el valle de Santo Domingo ubicado entre las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas, Los Ríos y Manabí. Por otro lado, en el país se cultivan en mayor cantidad abacá tipo

<sup>47</sup> MONTERO, P; NARANJO, I; Plásticos reforzados con fibra de abacá; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Diciembre-1988.

<sup>48</sup> SALAS, A; Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Febrero-2009.

bunganalón y en menor cantidad la de tangongón las cuales presentan diferencias expuestas en la Tabla 1.19.

Tabla 1.19. Diferencias entre las fibra cultivadas.<sup>49</sup>

Bunganalón	Tagongón
Variedad precoz	Producción de hijuelos limitados
Mayor desarrollo como planta	Tallos de diámetro y longitud mayores
Tallos pequeños y delgados	Ligeramente más resistente
Color café en la base y verde brillante en la parte superior	Fibra áspera pero fuerte
Fibras blancas y suaves	

### 1.3.3. BIOCMPUESTOS “GREEN COMPOSITES”

Gran cantidad de materiales compuestos que contienen fibra de carbono y fibra de vidrio han sido utilizados en las industrias aeroespacial, automotriz y de la construcción. Sin embargo, este tipo de materiales generan un problema de sostenibilidad a largo plazo, ya que debido a su complejidad es muy difícil generar estrategias para poder reciclarlos. Por lo tanto, varios materiales conocidos como biocompuestos han sido desarrollados presentando ventajas desde el punto de vista ambiental cuando su vida útil ha terminado.

Los biocompuestos se definen como materiales que combinan fibras naturales como el sisal, yute, kenaf y otros con una matriz de polímero biodegradable. Se utilizan fibras naturales ya que estas poseen ciertas ventajas frente a las fibras sintéticas, que incluyen biodegradabilidad, baja densidad, resistencia aceptable, bajo costo, alta dureza y menos uso de recursos no renovables. Consecuentemente el uso de este tipo de fibras ha aumentado notablemente, siendo así que al 2.006 la organización de agricultura y alimentos en Estados

---

<sup>49</sup> SALAS, A; Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Febrero-2009.

Unidos lo declaró como el año internacional de las fibras naturales, debido al incremento en el consumo y demanda de los productos basados en fibras.<sup>50</sup>

Una de las áreas donde las fibras se han establecido fuertemente ha sido dentro de la industria del empaquetamiento. De manera global, el sector del empaquetamiento contribuye con el 40% del total de consumo de plásticos, dando como resultado una asfixiante cantidad de desechos que paulatinamente se vuelven inmanejables. Por lo tanto y debido a nuevas leyes que rigen en diferentes ciudades en el mundo el consumo de polímeros biodegradables se ha incrementado, a pesar que el costo de producirlo es todavía alto. Como resultado, la creación de polímeros biodegradables reforzados con fibras naturales es el siguiente paso lógico para conseguir el equilibrio entre el costo y el beneficio ambiental al menos en la industria del empaquetamiento.

A continuación se enlistan las principales ventajas y desventajas de utilizar fibras naturales en el refuerzo de materiales compuestos. El menor coste final de productos, mejoramiento de propiedades mecánicas, biodegradabilidad de la fibra, el aislamiento térmico y acústico, el menor desgaste de las herramientas, el menor uso de energía en la producción, su característica no tóxica son unas de las ventajas de utilizar fibras como refuerzos. Sin embargo, la baja estabilidad dimensional, la absorción de agua, la limitada resistencia térmica, la calidad variable y su baja adhesividad hacen que se dificulte la utilización de fibras en aplicaciones como refuerzos.

#### **1.3.3.1. Procesamiento**

Los principales problemas asociados al procesamiento de materiales compuestos biodegradables utilizando fibras naturales radican en la inestabilidad térmica, la falta de homogeneidad y la naturaleza hidrofílica de las fibras. Por lo tanto, los biopolímeros con temperaturas de fusión menores a 200°C deben ser seleccionados para minimizar la degradación de la fibra. Al igual que los polímeros

---

<sup>50</sup> PICKERING, KIM; Properties and performance of natural-fibre composites; Woodhead Publishing Limited; Cambridge- England; 2008.



biodegradables, estos materiales pueden ser procesados bajo diferentes técnicas; tales como, el termoformado, extrusión, moldeo por inyección y otros.

Fibras largas pueden ser utilizadas en procesos de moldeo por compresión lográndose mantener la longitud de las fibras. Sin embargo, el desgaste o daño de las fibras es significativo en los procesos de extrusión el cual normalmente precede al moldeo por inyección. Por lo tanto, estas dos técnicas no son confiables si se necesita mantener la longitud de las fibras. Para optimizar la dispersión de fibras (particularmente en procesos de extrusión e inyección) existen algunas formas para el mezclado antes del procesamiento de los especímenes. Para esto se usan extrusoras que en ciertas ocasiones se aplican en serie. Sin embargo, la falta de compatibilidad entre las fibras naturales y las matrices a menudo tiene más relación con las diferencias en la polaridad. Se han desarrollado modificaciones en la fibra y en la matriz para mejorar la dispersión y adhesión de la fibra en la matriz. Algunos métodos de procesamiento de materiales compuestos reforzados con fibras naturales dan como resultado el deterioro de la fibra. En particular, algunos especímenes que se someten a las mezclas seguidas de una granulación antes de la inyección producen reducciones en la longitud de la fibra.

Debido a la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales, estas deben secarse antes de su utilización, con el fin de optimizar las propiedades mecánicas, ya que el agua reduce la resistencia de la fibra en la interfaz; además, al momento de la evaporación de estos residuos de agua se produce porosidades. Por lo tanto, con el secado de las fibras se logra una mejora en la resistencia a la tracción y en el módulo de elasticidad en un 10 al 20%.

### **1.3.3.2. Biocompuestos elaborados a base de PLA**

En el caso del PLA se pueden distinguir dos categorías de materiales. El primer grupo son aquellos productos que mayoritariamente son utilizados en aplicaciones médicas, mientras que el segundo grupo son los polímeros elaborados para aplicaciones estructurales. En este estudio toma en cuenta aquellos que son utilizados para aplicaciones estructurales.

Existen muchas razones por las cuales nace el interés de utilizar fibras naturales en matrices de polímero biodegradable. Entre estas se encuentran mejorar las propiedades mecánicas de las matrices, mejorar la estabilidad térmica, biodegradabilidad y la disminución del costo debido al reemplazo parcial de matriz por las fibras. Además, existen otras razones más específicas para preparar materiales compuestos a base de PLA. Primero, el PLA tiene una ventaja frente a otros polímeros biodegradables a escala comercial. A su vez, como ya se dijo anteriormente, el material posee buenas propiedades mecánicas similares a las del poliestireno. Finalmente, el PLA puede ser trabajado sin necesidad de equipo sofisticado y sus temperaturas de fusión son bajas permitiendo que las fibras no sufran biodegradación en la producción de materiales compuestos.

Varios estudios han sido realizados principalmente por países de la unión Europea añadiendo fibras naturales en matrices de PLA donde uno de los objetivos principales eran crear piezas para la industria automotriz como principal mercado potencial. En el 2.006 un cobertor de llanta de emergencia fue desarrollado por Toyota reforzando PLA con fibras de kenaf. Otros resultados serán presentados con mayor concentración más adelante para estudios de PLA reforzado con fibra de abacá. Como resultado de estos estudios se definió el comportamiento que el PLA sufre al ser combinado con fibras naturales.<sup>51</sup>

### **Propiedades térmicas de los compuestos de PLA-fibras naturales<sup>52</sup>**

Una clara ventaja de este tipo de compuestos es que su temperatura de transición vítrea para aplicaciones prácticas aumenta significativamente. En ciertos estudios, la resistencia a la tracción a elevadas temperaturas (50°C) fue comparable con la medida obtenida a 23°C. En promedio la resistencia a la tracción a 50°C fue de 31,4 MPa, que significaba el 60 % de la resistencia a 23°C (50,1 MPa). Además, el efecto del medio ambiente en las propiedades mecánicas de los biocompuestos depende de la matriz, del tratamiento de las fibras y los cambios sufridos durante

---

<sup>51</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p.467.

<sup>52</sup> MOHANTY, A; MISRA, M; DRZAL, L; Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites; Taylor & Francis, Boca Raton, 2005

el moldeo. El ambiente menos favorable para las propiedades de los biocompuestos es cuando este expone repetidamente a cambios de temperatura y elevados valores de humedad relativa. (90-100% HR).

### **Reprocesamiento mediante reciclado**

Un estudio realizado por investigadores finlandeses, mostró que para compuestos obtenidos de un segundo proceso se obtenía un decremento de la resistencia a la tracción (23%), resistencia al impacto (8%) y en el módulo de elasticidad (5%) como también una disminución en la masa molar del PLA.<sup>53</sup>

#### **1.3.3.3. Propiedades mecánicas de biocompuestos PLA/fibras naturales**

Las propiedades mecánicas de los biocompuestos de PLA y fibra natural son afectadas por la longitud de la fibra, morfología de la fibra, orientación de la fibra, porcentaje de fibra añadido y el grado de polimerización de la celulosa presente en la fibra. Asimismo, las propiedades mecánicas del biocompuesto también dependerán de las propiedades de la matriz (masa molar, contenido residual de láctida) como de las condiciones de procesamiento. A continuación se muestran diversos valores obtenidos en diferentes estudios llevados a cabo en algunas universidades alrededor del mundo. Estos valores servirán como medio de comparación con los resultados de este estudio.

En la Tabla 1.20 se presentan algunos de los valores conseguidos después de la caracterización de biocompuestos de PLA con diferentes fibras naturales. Los porcentajes representan a las fracciones en peso añadidas de fibra en la matriz.

Tabla 1.20. Propiedades a tracción e impacto de biocompuestos de PLA- fibra natural.<sup>54</sup>

---

<sup>53</sup> MAKINEN,K; Biokomposiittien pitkaaikaikaiskestavyys; Master Thesis; Technical University of Tampere; Finland; 2002.

<sup>54</sup> MOHANTY, A; MISRA, M; DRZAL, L; Natural fibers, Biopolymers, and Biocomposites; Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.

<b>Fibra y contenido de fibra</b>	<b>Tipo de PLA</b>	<b>Método de procesamiento</b>	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistencia al impacto (kJ/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Lino (0,30%)</b>	PLLA	Extrusión + moldeo	70	8,4	17,8
<b>Lino (0,40%)</b>	PLA	Moldeo por inyección	68	7,2	
<b>Lino (0,50 %)</b>	PLA	Moldeo por compresión	99	6,0	
<b>Algodón (30%)</b>	PLLA	Extrusión + moldeo	30	6,8	5,8
<b>Yute (40%)</b>	PLLA	Moldeo por compresión	100	9,4	14,5

Además, de acuerdo a un estudio donde se ha reforzado PLA con fibras dispersas de 5 mm de abacá en diferentes cantidades. Los resultados de estos estudios arrojaron solamente valores para el ensayo de flexión, donde la resistencia máxima no tuvo un incremento considerable, pero el módulo a flexión si aumentó. Este estudio también evidenció que no existe una mejora considerable en las propiedades de los materiales si se realiza cualquier tipo de tratamiento a la fibra. En la Figura 1.26 se muestra los resultados del estudio.<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> YU, L; J; Biodegradable polymer blends and composites from renewable resources; Wiley; 2.009, New Jersey, USA.

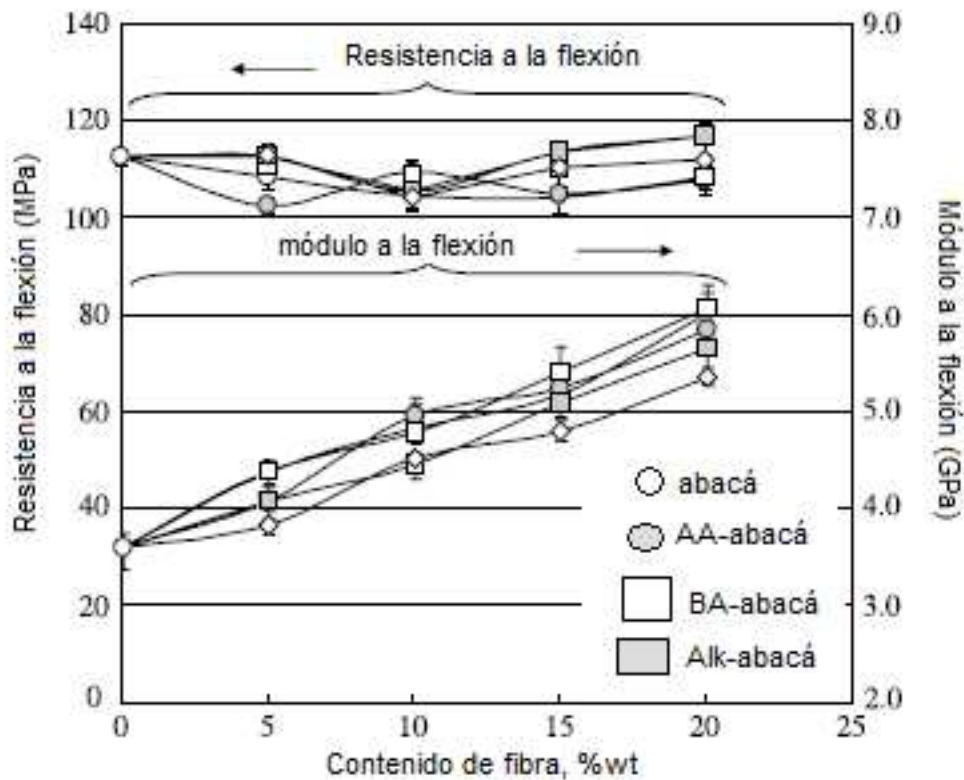


Figura 1.26. Propiedades a flexión de compuestos de PLA/abacá.

De acuerdo a la información recabada en este apartado, se pudo definir que el desarrollo, producción y aplicación de los polímeros biodegradables es una realidad en el mundo y va en aumento. Principalmente si se habla del ácido poliláctico (PLA), que debido a sus propiedades es el que ha alcanzado mayor aplicaciones en diferentes industrias, tales como la médica, empaquetamiento y textil. Sin embargo, todavía su desarrollo no le ha permitido incursionar en aplicaciones donde los requerimientos mecánicos sean más severos. Por lo tanto, tomando como referencia todo el conocimiento adquirido y resultados obtenidos en el desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales, el paso más lógico a seguir es reforzar este tipo de matrices biodegradables con fibras naturales, para mejorar sus características mecánicas sin afectar el carácter biodegradable de las mismas.

En este caso el estudio generará resultados para conocer el efecto real que las fibras tienen al momento de combinarlas con una matriz del tipo biodegradable. Además, que entregará resultados más completos que los encontrados en diferentes bibliografías, abarcando con totalidad a las propiedades mecánicas del

material. Esta información, dependiendo de los resultados será muy valiosa para la consecución de futuras de aplicaciones industriales del material.

En otro estudio llevado a cabo en Alemania, cuando se reforzó el PLA con fibras de abacá (30%: fracción en peso) la resistencia máxima a la tracción y el módulo de elasticidad se incrementaron en un factor de 2,4 y 1,2, respectivamente. Para el caso de la resistencia al impacto, con probetas muescadas, se obtuvo un incremento en un factor de 2,4. Estos resultados se muestran en la tabla xxx. Sin embargo, cabe anotar que estos materiales fueron obtenidos mediante un procesamiento (inyección) diferente al utilizarse en este estudio, pero que permite utilizar estos valores como base de comparación con los resultados que se obtengan.

Tabla 1. 21. Propiedades mecánicas del PLA y de un material compuesto PLA/abacá.<sup>56</sup>

Tipo de material	Fracción en peso de fibra	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia máxima a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a la flexión (MPa)	Resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> )
PLA	0%	63	3373	109	3690	2,2
PLA/abacá	30%	72	8032	124	7890	5,2

## 1.4. OBJETIVOS Y ALCANCE

### 1.4.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es:

Obtener, caracterizar y evaluar las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable de ácido poliláctico (PLA)

<sup>56</sup> BLEDZKI, A; JASZKIEWICZ, A; SCHERZER, D; Mechanical properties of PLA composites with man. Made cellulose and abaca fibers; university of Kassel; Institute fur Werkstofftechnik; Elsevier; Germany, 2009.

reforzado con fibras de abacá, con el fin de determinar las condiciones más favorables que permitan usar este material en diferentes aplicaciones.

Los objetivos específicos son:

- Recopilar información bibliográfica sobre los materiales poliméricos biodegradables y las fibras naturales a utilizarse.
- Definir los parámetros más adecuados para el procesamiento del material compuesto mediante moldeo por compresión.
- Obtener probetas normalizadas del material compuesto formulado.
- Caracterizar las propiedades mecánicas del material obtenido a través de ensayos de tracción, flexión e impacto, realizados bajo normas establecidas para este tipo de materiales.
- Obtener un prototipo usando la formulación que presente las mejores propiedades mecánicas y evaluarlo desde el punto de vista funcional.

#### **1.4.2. ALCANCE**

- Se recopilará la información bibliográfica necesaria para el estudio de los materiales biodegradables disponibles y de las fibras naturales utilizadas en la formulación de materiales compuestos.
- Se construirá un molde para elaborar probetas del material compuesto.
- Se analizarán los diferentes métodos de procesamiento del material y se definirán los parámetros de presión, temperatura, y tiempos de precalentamiento, moldeo y enfriamiento para moldear por compresión utilizando en la prensa calefactora del Laboratorio de Nuevos Materiales y el molde construido.
- Se elaborarán probetas normalizadas del material compuesto.
- Se tabularán las propiedades mecánicas del material compuesto formulado con los resultados obtenidos después de la realización de ensayos de tracción, flexión e impacto bajo las normas establecidas para estos tipos de materiales.
- Se elaborará y evaluará un prototipo de aplicación con el material obtenido en el procesamiento.

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo inicialmente se listan las características de los materiales empleados para la obtención de las láminas de matriz pura de PLA como de las láminas de los compuestos reforzados con fibra y a su vez los equipos utilizados para la fabricación y caracterización de estos materiales. Seguidamente se define la estrategia metodológica llevada a cabo para obtener las láminas. Además, se presentan los procedimientos llevados a cabo para la caracterización mecánica de los materiales elaborados. Finalmente, se define los parámetros de selección del prototipo para con esos resultados escoger la mejor opción mediante un criterio ponderado y proceder a la fabricación del mismo.

#### **2.1. MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO**

En este trabajo se obtuvieron tanto materiales de matriz polimérica biodegradable (PLA), como materiales compuestos de esta matriz reforzada con fibras naturales de abacá, en diferentes configuraciones, disposiciones y cantidades. Estos materiales fueron procesados mediante moldeo por compresión manual, de donde se definieron los parámetros de procesamiento, tales como presión, tiempo y temperatura, para obtener láminas de matriz pura y reforzada con las mejores características. Una vez establecidos estos parámetros se definió el porcentaje máximo y mínimo de fibra que puede ser ingresado en la matriz. Con este conocimiento se fabricaron láminas de material puro y material compuesto para de ellas obtener probetas normalizadas, las mismas que fueron caracterizadas mecánicamente por medio de ensayos de tracción, flexión e impacto. Finalmente, con láminas tanto de material puro como de material compuesto, se llevó a cabo un proceso de termoformado de estas láminas, para obtener el prototipo seleccionado en el estudio.



### 2.1.1. MATERIALES

Como ya se dijo anteriormente, como matriz de los materiales compuestos biodegradables se utilizó ácido poliláctico Ingeo 2002D producido por la empresa norteamericana NatureWorks LLC. En la Tabla 2.1 , se presenta un resumen de las propiedades entregadas por el fabricante en su hoja técnica, la misma que se encuentra en el ANEXO 3 .

Tabla 2.1. Propiedades del PLA 2002D producido por NatureWorks LLC.<sup>57</sup>

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Valor</b>
Gravedad específica	1,24
Índice de fluidez , g/10 min (210C/2,16 Kg)	5,00-7,00
Claridad	Transparente
<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Valor</b>
Resistencia a la tracción , ksi	7,70
Porcentaje de elongación (%)	6,00
Módulo de elasticidad, ksi	500
Energía de Impacto Izod, J/m	12,81

El material que se empleó como refuerzo para la elaboración del material compuesto fue la fibra de abacá de variedad Tangongón rojo. Estas fibras fueron suministradas por un productor de la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas, perteneciente a la Corporación de Abacaleros del Ecuador (CAE). Las propiedades mecánicas de esta fibra se encuentran tabuladas en la Tabla 2.2.

<sup>57</sup> NatureWorks; PLA Polymer 2002D ; extrusion/thermoforming brochure applications; 2008.

Tabla 2.2. Propiedades de la fibra de abacá de variedad Tangongón rojo.<sup>58</sup>

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Finura	(DENIER)	38,0
Densidad	(g/cm <sup>3</sup> )	1,3
Resistencia última a la tracción	(MPa)	774,7-1261,3
Elongación antes de la ruptura	(%)	2,0 - 3,0
Tenacidad	(g/DENIER)	3,0 – 4,0
Absorción de agua	(%)	8,0 - 10,0

Es importante indicar, que fue necesario utilizar un agente desmoldante para facilitar el retiro de las láminas del molde después de ser moldeadas. Este agente fue de la marca SIMONIZ la misma que está compuesta de destilados de petróleo, parafina refinada, cera carnuba y siliconas especiales.

### 2.1.2. EQUIPOS

Los equipos y herramientas que se utilizaron para realizar el proceso de moldeo por compresión fueron los siguientes: moldes metálicos, estufa, termocupla, balanza digital, entre otros.

Para llevar a cabo el moldeo por compresión manual se utilizó una prensa calefactora marca CARVER modelo 4128, la misma que constaba de dos placas calefactoras con una separación de 117 mm entre ellas, dos controles de temperatura digital para cada placa con temperaturas máximas de 343°C (650°F) y dos manómetros de baja y alta presión con presiones máximas de 1.000 psi y

---

<sup>58</sup> SALAS, A; Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Febrero-2009.

60.000 psi respectivamente. Esta prensa y sus controles se indican en la Figura 2.1

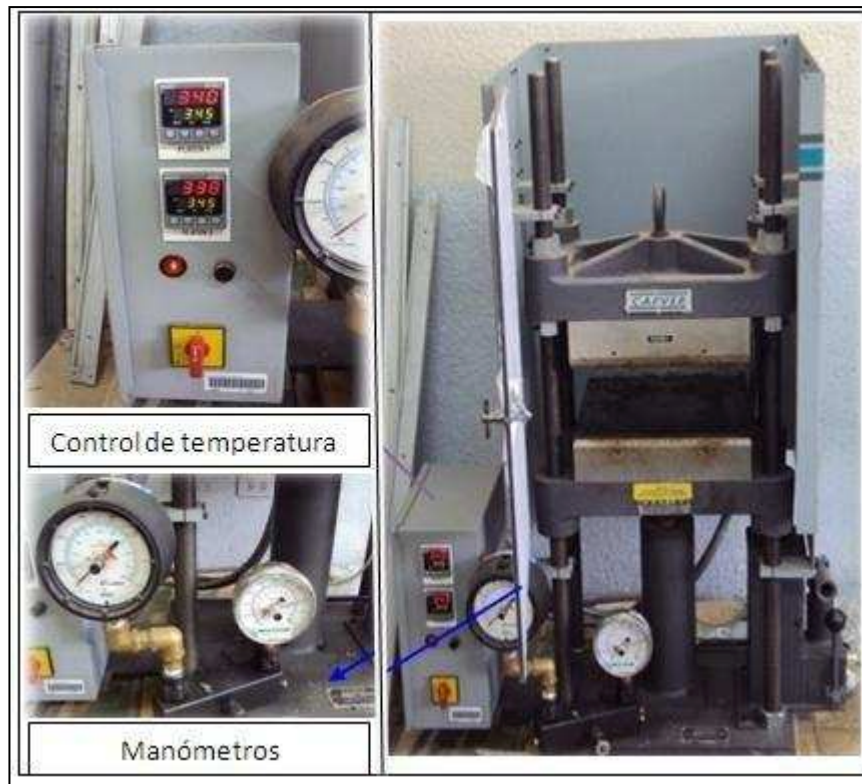


Figura 2.1. Prensa Calefactora marca CARVER modelo 4128.

Para pesar la cantidad de material a utilizar en el moldeo, tanto de resina biodegradable como de fibra natural, se empleó una balanza digital marca ADAM modelo PGL 6001, la misma que se muestra en la Figura 2.2, y que tiene una capacidad de 6.000 g y una apreciación de 0,1 g.

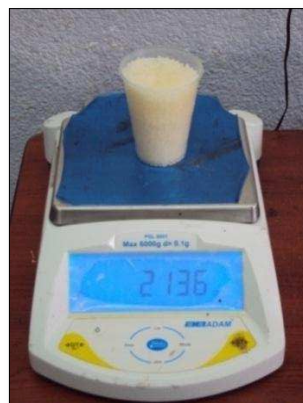


Figura 2.2. Balanza digital marca ADAM modelo PGL 6001.

Se fabricó un molde de tipo macho/hembra de 240 mm x 240 mm para elaborar los materiales compuestos. Además, se utilizaron placas de aluminio para transmitir el calor y presión sobre la parte superior del molde. Estos elementos se constan en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Molde metálico y placas de aluminio.

Por otro lado, para el control de la temperatura en el procesamiento del PLA, se empleó un medidor de temperatura marca Fluke junto con una termocupla tipo J, ambos representados en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Medidor de temperatura marca Fluke y termocupla tipo J.

Para llevar a cabo el enfriamiento bajo presión de las láminas elaboradas se utilizó una prensa hidráulica manual de 12 toneladas de capacidad. Esta prensa

tal y como se aprecia en la Figura 2.5, era de doble columna con una separación de 660 mm entre ellas.



Figura 2.5. Prensa hidráulica de 12 toneladas para enfriamiento de láminas bajo presión.

Además, tanto el secado del PLA como de las fibras naturales se llevó a cabo en una estufa marca Venticell dotada de un control de temperatura y tiempo marca MM group, como se muestra en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Estufa para secado del PLA y de la fibra natural marca Venticell.

La caracterización mecánica y la evaluación de las propiedades de la matriz pura de PLA y de los materiales compuestos, se realizaron con muestras elaboradas de acuerdo al procedimiento de obtención de los materiales expuesto más adelante en este apartado. La evaluación de las propiedades mecánicas de tracción y flexión de la matriz pura de PLA y de los materiales compuestos biodegradables se realizó en la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS de una capacidad máxima de 25.000 N. En la Figura 2.7 se muestra la máquina universal de ensayos y los respectivos accesorios para realizar los ensayos de tracción y flexión.

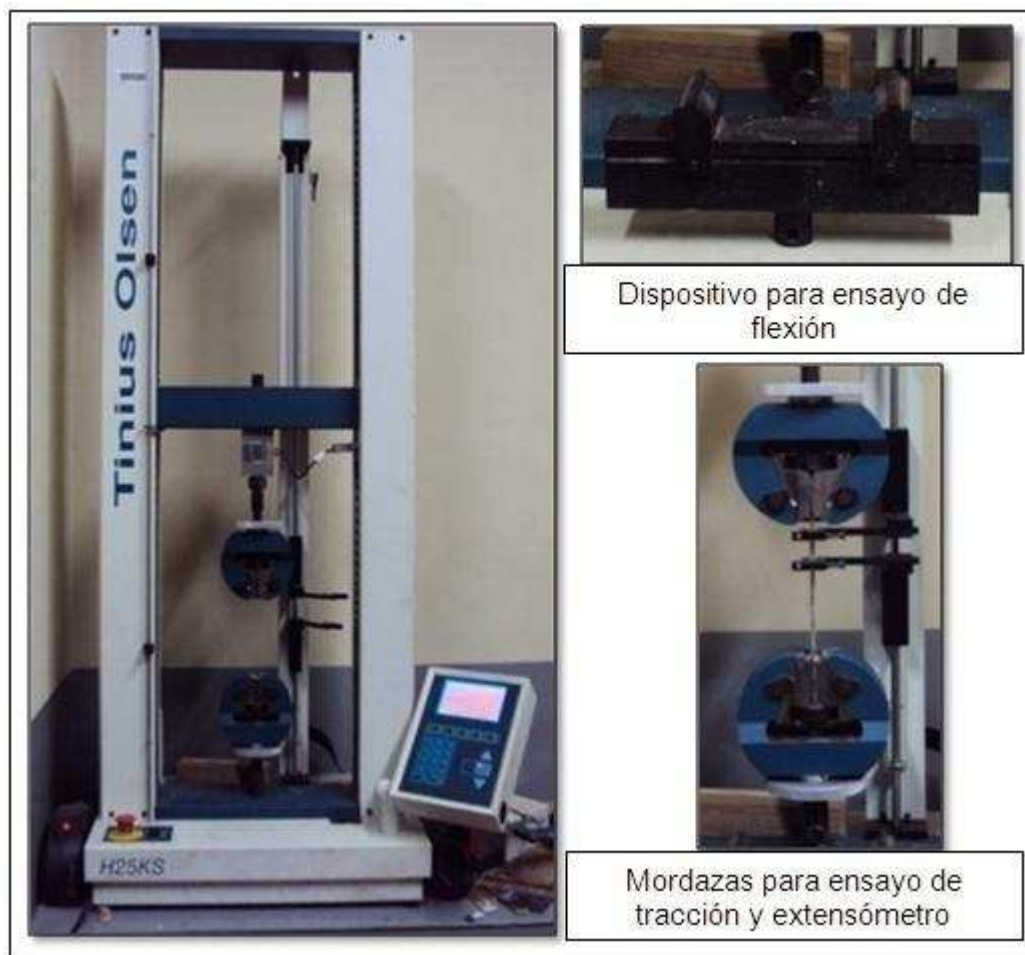


Figura 2.7. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS.

La evaluación de la resistencia al impacto de los materiales se efectuó en la máquina de impacto marca Tinius Olsen modelo IT 504, la misma que se muestra en la Figura 2.8 junto con los implementos necesarios para realizar el ensayo.





Figura 2.8. Máquina de impacto Tinius Olsen modelo IT 504.

Con el fin de establecer las dimensiones de las probetas se utilizó un medidor de espesores marca Distenics, un calibrador digital marca Mitutoyo y un medidor de ranuras para el ensayo Charpy marca Tinius Olsen, los mismos que se muestran en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Equipos utilizados en la medición de las dimensiones de las probetas.

Para verificar posibles casos de degradación de la matriz durante el procesamiento de los materiales se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo (FTIR) marca PerkinElmer modelo Spectrum 100, con una precisión de  $0,01 \text{ cm}^{-1}$  en el eje de las abscisas. El espectrofotómetro se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Espectrofotómetro infrarrojo marca PerkinElmer.

En la elaboración del prototipo se empleó una estufa Thermo Scientific modelo Cimarec con un rango de temperatura de 5 a 540°C. La Figura 2.11, muestra la estufa utilizada en el calentamiento de las láminas posteriormente termoformadas.



Figura 2.11. Estufa para calentamiento de láminas Thermo Scientific modelo Cimarec.

Además, se fabricó un molde de acero de 180 x 180 x 180 mm del tipo macho-hembra, para termoformado de cajas para empaque de productos de 90 x 110 x 35 mm. El molde se muestra en la Figura 2.12 y los planos del mismo se encuentran adjuntos al presente estudio en el ANEXO 2.



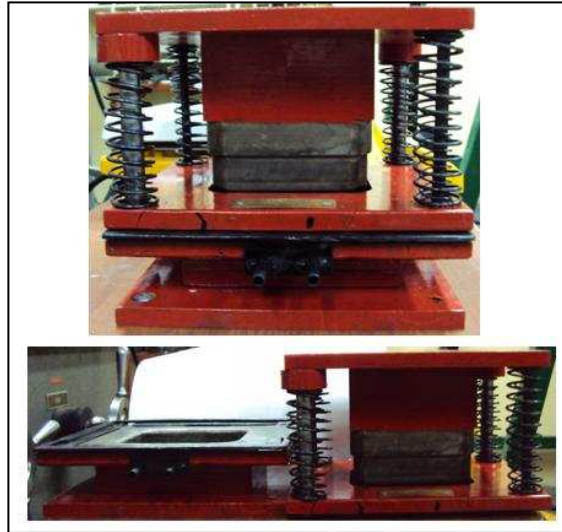


Figura 2.12. Molde de acero para termoformado.

Finalmente, se utilizó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo Super L de 120.000 lbf de capacidad, ubicada en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV), con la finalidad de acoplar el macho del molde en el cabezal fijo y la hembra sobre el cabezal móvil, y así ejercer la fuerza necesaria para termoformar las láminas de material. La máquina universal de ensayos se muestra la Figura 2.13.

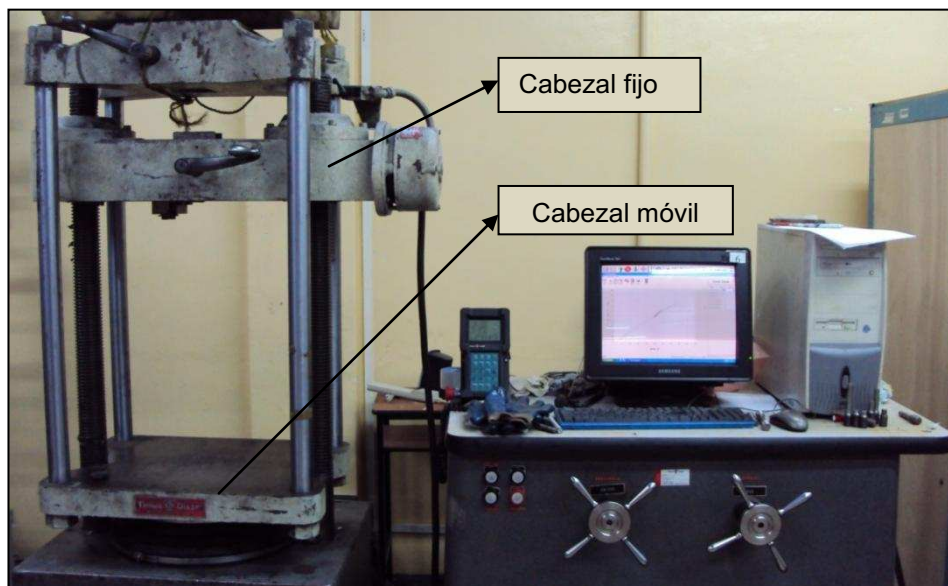


Figura 2.13. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo Super L.

## 2.2. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

En este caso se definieron dos estrategias metodológicas. La primera fue para la obtención de las láminas de ácido poliláctico puro mediante moldeo por compresión. Inicialmente, se preparó la materia prima, es decir los pellets de PLA se sometieron a un proceso de secado. Posteriormente, se efectuaron pruebas preliminares para establecer los parámetros a considerar durante las fases del moldeo por compresión. Dentro de la fase de moldeo se desarrolló un método iterativo para definir los parámetros de procesamiento más adecuados y obtener láminas de ácido poliláctico con un mínimo de fallas. A continuación, y una vez definidos los parámetros de moldeo de las láminas de PLA, se definió la estrategia metodológica para la obtención de los materiales compuestos. Este proceso inició con el corte y secado de la fibra, para después junto con las láminas de PLA realizar el moldeo tipo sánduche de los materiales. Una vez más se llevó a cabo un método iterativo para definir los parámetros de procesamiento. Así se elaboraron materiales con diferentes fracciones volumétricas para precisar la fracción volumétrica máxima y mínima de fibra a introducir en la matriz. Estas dos metodologías se presentan en las Figuras 2.14 y 2.15.

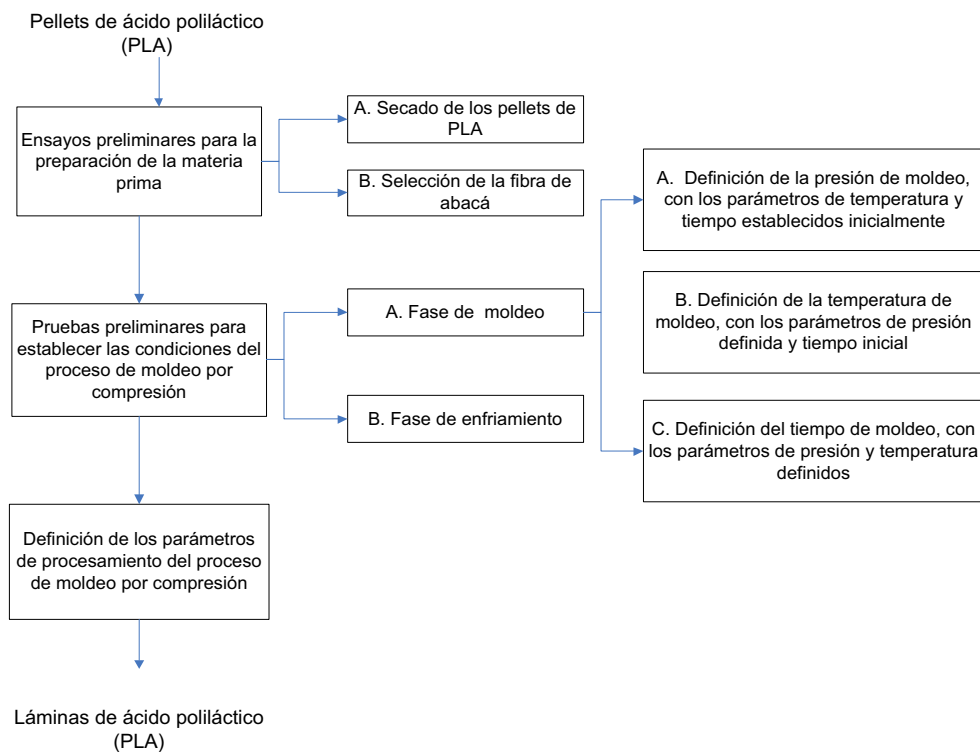


Figura 2.14. Estrategia metodológica para la obtención de láminas de PLA.

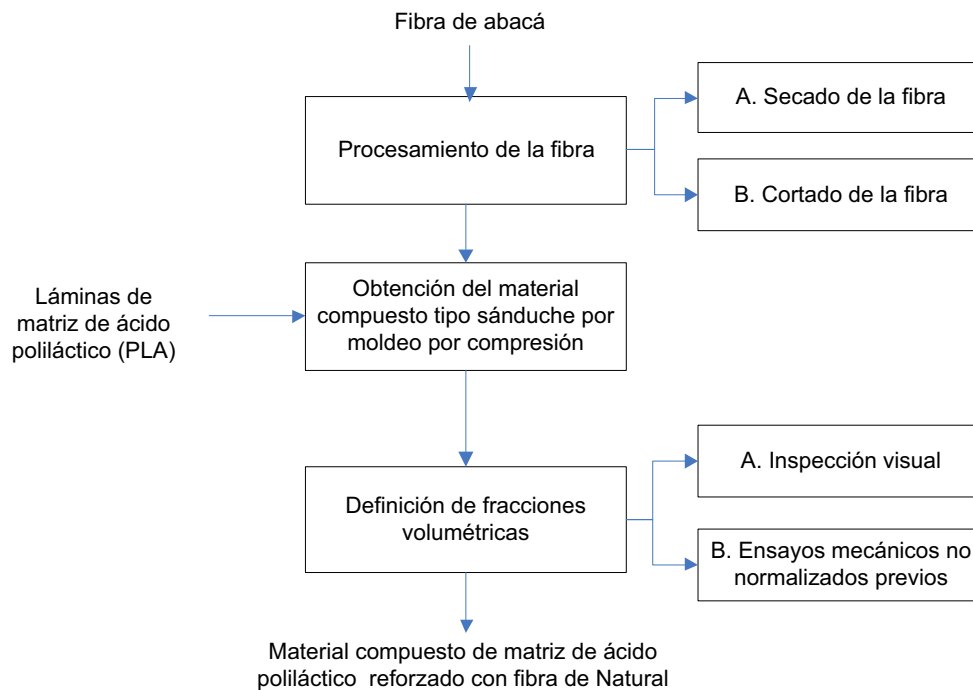


Figura 2.15. Estrategia metodológica para la elaboración de materiales compuestos de matriz de ácido poliláctico y reforzados con fibras de abacá.

### 2.2.1. ENSAYOS PRELIMINARES

Los ensayos preliminares consistieron en la preparación de la materia prima. El PLA se secó antes de su utilización a 70°C por un periodo de 2 horas y fue mantenido en un desecador hasta el momento de ingresarlo al molde, de acuerdo con la información bibliográfica revisada y que se muestra en la Tabla 1.8. A su vez, se realizaron pruebas para comprobar la temperatura de fusión real del PLA colocando cierta cantidad de material en el molde y calentándolo hasta su punto de fusión. La medición se realizó con una termocupla tipo J y los valores obtenidos se compararon con aquellos que el fabricante del polímero presentaba en su hoja técnica, dando como resultado valores con una gran diferencia de temperatura. Los valores medidos fueron de entre 160 y 165°C. Los valores que la casa comercial entrega es una temperatura de fusión de 210°C. Esta diferencia puede darse por el método de medición de la temperatura, ya que el valor obtenido en el estudio fue tomado de acuerdo al método de procesamiento utilizado. Esta hoja técnica se muestra en el ANEXO 3. Es importante indicar que dependiendo del equipo y las condiciones de procesamiento estos valores pueden

variar, ya que la transferencia de calor entre las placas calefactoras al molde y finalmente al material, dependerán de diversos factores como el medio transmisión, las condiciones ambientales y los materiales.

La fibra de abacá exhibía en su estado natural diferentes características respecto a su color, espesor y longitudes. Asimismo, presentaba residuos no fibrosos producto de su extracción y transporte. Por lo tanto, entre los pasos previos a la elaboración de los materiales compuestos se realizó la siguiente preparación de la fibra:

- La fibra fue desenreda y a su vez se retiraron los extremos donde presentaba una excesiva pilosidad.
- Se separó la fibra que se encontraba en el mejor estado, tomando en cuenta criterios tales como color, limpieza y pilosidad. De acuerdo al color las mejores fibras de abacá son finas, brillantes y de un color habano claro. En cuanto a la limpieza se retiró residuos de tierra u otros elementos extraños adheridos a la fibra en su transporte. Y lo referente a su pilosidad, se descartó los extremos de la fibra donde esta perdía consistencia y empezaba a desprenderse en pequeños hilos. Este fenómeno se muestra en la Figura 2.16.
- Finalmente, se descartaron aquellas zonas donde la fibra se encontraba enredada

Una vez preparadas tanto la matriz como la fibra se ejecutaron ensayos previos con el molde de acero para verificar su funcionamiento y posibles fallas del mismo al momento del procesamiento de los materiales. Además, se verificó que su terminado superficial sea el adecuado para elaborar las láminas con el mínimo de rayones superficiales.



Figura 2.16. Pilosidad en los extremos de la fibra de abacá almacenada.

#### 2.2.1.1. Parámetros de moldeo por compresión de láminas de ácido poliláctico puro (PLA)

Una vez secado el PLA, se definió las condiciones adecuadas para cada una de las fases del moldeo por compresión. Las fases dentro de este proceso fueron calentamiento o moldeo y enfriamiento. De esta forma, para iniciar con el proceso de moldeo, se encendió la prensa y se programaron las temperaturas de cada una de las placas. Se colocó la hembra del molde en la prensa calefactora para eliminar residuos de agua en el molde. Posteriormente, se colocó una capa de cera desmoldante con una esponja, de manera uniforme, en toda la superficie tanto en el macho como en la hembra del molde, como se muestra en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Aplicación de cera desmoldante sobre el molde.

Igualmente, se pesaron las cantidades necesarias de ácido poliláctico de acuerdo con la Ecuación 2.1, considerando el espesor de lámina que se deseaba obtener como se indica en la Tabla 2.3.

$$m_{PLA} = \rho_{PLA} \times V_{molde} \quad 2.1$$

Donde  $\rho_{PLA}$  = densidad del PLA y  $V_{molde}$  = volumen del molde.

Tabla 2.3. Espesor requerido para elaborar las láminas de acuerdo con los ensayos mecánicos.

Tipo de probeta	Espesor de la lámina (mm)	Norma
Probetas de tracción	2,50	ASTM D 3039-08
Probetas de flexión	4,00	ASTM D 7264-07
Probetas para Impacto	6,40	ASTM D 256-10

A lo largo de la hembra del molde se colocaron los pellets de PLA uniformemente. Seguidamente, se colocó el macho del molde y sobre éste las placas de aluminio que permitieron aplicar la presión y transferir el calor hacia el macho del molde. Este proceso se muestra en la Figura 2.18.





Figura 2.18. Colocación de los pellets de PLA en el molde.

### (i) Fase de moldeo

Para establecer los parámetros de procesamiento de las láminas de la matriz de PLA se consideraron diferentes valores de presión, temperatura y tiempos de moldeo. La obtención de estas láminas se realizó con enfriamiento acelerado, es decir, se expuso el molde caliente directamente a la acción del agua.

Para iniciar con la fase de moldeo se definieron como parámetros el tiempo y la temperatura programada en las placas de la prensa. El tiempo fue considerado en 10 minutos para el caso de láminas de 2,5 mm de espesor y una temperatura de 180°C (356°F) tanto para la placa superior como inferior. La presión de moldeo fue considerada como variable, así se probaron tres diferentes presiones de moldeo para obtener láminas del material, como se muestra en la Tabla 2.4. Estas presiones se definieron tomando en cuenta la experiencia alcanzada en el moldeo

por compresión de uno de los polímeros termoplásticos más simples y básicos como es el polietileno, el mismo que ha sido trabajado en estudios anteriores.<sup>59</sup>

Tabla 2.4. Definición de la presión en la fase de moldeo para obtener láminas de PLA.

Presión*	Valor (psi)
P <sub>1</sub>	1500
P <sub>2</sub>	3000
P <sub>3</sub>	6000

\*P: presión ejercida a través del gato hidráulico de la prensa sobre el molde

Posteriormente, se seleccionó la presión de moldeo con la que se obtuvo los mejores resultados en las láminas. Para definir los valores de las temperaturas de las placas de la prensa para el proceso de moldeo, se elaboraron láminas de la matriz de PLA con el valor de la presión de moldeo seleccionada anteriormente y manteniendo un tiempo de moldeo igual a 10 minutos. En la Tabla 2.5 se indican los valores de las temperaturas de las placas de la prensa. Debido a que la prensa trabaja con sistema inglés de unidades se presentan los valores de temperatura tanto en grados Fahrenheit (°F) como en grados Celsius (°C).

Tabla 2.5. Temperaturas de las placas de la prensa y del molde consideradas durante la fase de moldeo para obtener láminas de PLA.

Ensayo	Ts (°F/°C)	Ti (°F/°C)	Temperatura promedio en la cara superior del molde (°C)
1	370/188	365/185	169,1
2	345/174	340/171	162,5
3	320/160	315/157	136,4

---

<sup>59</sup> SALAS, A; Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Febrero-2009.p.149.



Donde  $T_s$ : temperatura de la placa superior y  $T_i$ : temperatura de la placa inferior de la prensa calefactora.

Finalmente, para definir el tiempo de moldeo se elaboraron láminas de matriz de PLA con los valores de presión y de temperaturas de las placas calefactoras definidos experimentalmente. Los tiempos de moldeo probados se indican en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Definición del tiempo en la fase de moldeo (t) para obtener láminas de PLA.

Tiempo	Valor (min)
$t_1$	15 min
$t_2$	11 min
$t_3$	8 min

Para seleccionar los parámetros de presión, temperatura de las placas y tiempo de moldeo, se tomaron en cuenta los siguientes criterios durante la inspección visual:

- Cantidad de fallas superficiales y burbujas internas en la lámina.
- Homogeneidad de la lámina y la fusión del material en la misma.
- Degradación en la lámina por exceso de calor o por los tiempos de moldeo aplicados.
- Cantidad de desecho de material por los costados del molde.
- Espesores similares a lo largo de la geometría de la lámina.

## (ii) Fase de enfriamiento

Para la fase final del moldeo por compresión, se experimentaron tres tipos de enfriamiento en láminas de PLA obtenidas a partir de la aplicación de los parámetros seleccionados y establecidos en la fase de moldeo. Se probaron otros dos tipos diferentes de enfriamiento complementarios al ya utilizado en el proceso de obtención de los parámetros de moldeo con el objetivo de mejorar el proceso y los resultados.

Los enfriamientos probados fueron:

- **Enfriamiento a temperatura ambiente:** Que consistió en exponer el molde, después del proceso de moldeo, a un enfriamiento a temperatura ambiente sin aplicación de presión.
- **Enfriamiento lento:** Que consistió en enfriar el molde mediante la aplicación de paños humedecidos con agua.
- **Enfriamiento acelerado:** Este enfriamiento consistió en exponer al molde a la acción directa del agua y fue el método utilizado para definir los parámetros en la fase de moldeo.
- **Enfriamiento lento con aplicación de presión:** Consistió en exponer el molde a un enfriamiento a temperatura ambiente con aplicación de presión.

#### 2.2.1.2. Elaboración de láminas de material compuesto

La elaboración de probetas de material compuesto biodegradable reforzado con fibra se realizó bajo los parámetros de procesamiento definidos para la matriz de PLA pura. El compuesto que se obtuvo fue un material tipo sánduche, en el que se colocó fibra de abacá de diferentes configuraciones entre dos láminas de matriz polimérica de ácido poliláctico.

A continuación se detallan las consideraciones realizadas para la obtención de las probetas de material compuesto:

- Se experimentaron dos orientaciones de la fibra en la matriz y se utilizaron los siguientes porcentajes en volumen de fibra de abacá 10, 13, 15 y 20 %.
- Se fabricaron láminas de PLA de diferentes espesores, de acuerdo con la cantidad de fibra adicionada.
- Se obtuvo un compuesto tipo sánduche por medio de moldeo por compresión.

Las cantidades necesarias de PLA y de fibra de abacá se calcularon de acuerdo con las siguientes ecuaciones y considerando la fracción volumétrica utilizada para obtener el material compuesto.

La masa de fibra requerida se calculó de acuerdo con la Ecuación 2.2.

$$m_f = x_f \times V_{bc} \times \rho_f \quad 2.2$$

Donde  $x_f$ : fracción en volumen de fibra,  $V_{bc}$ : volumen del material compuesto y  $\rho_f$ : densidad de la fibra de abacá.

La masa del ácido poliláctico requerida se obtuvo de acuerdo con la Ecuación 2.3.

$$m_{PLA} = (1 - x_f) \times V_{bc} \times \rho_{PLA} \quad 2.3$$

Donde  $x_{PLA}$ : fracción en volumen de PLA,  $V_{bc}$ : volumen del material compuesto y  $\rho_f$ : densidad del PLA.

La masa de cada lámina de ácido poliláctico se calculó de acuerdo con la Ecuación 2.4.

$$m_{Lámina\ de\ PLA} = \frac{m_{PLA}}{2} \quad 2.4$$

La elaboración del material compuesto consistió en colocar una lámina de matriz de PLA en la hembra del molde y sobre ésta se colocó la cantidad de fibra abacá según la fracción volumétrica. Una vez distribuida la fibra sobre la lámina de PLA, se colocó la segunda lámina de matriz de PLA, con el fin de obtener una configuración tipo sánduche. Finalmente, se puso el macho del molde y sobre éste las placas de aluminio para la transferencia de calor y de presión hacia el material compuesto. Este proceso se ejemplifica en la Figura 2.19.



Figura 2.19. Moldeo tipo sánduche de los materiales compuestos.

### (i) Fase de moldeo

Para establecer los parámetros de procesamiento de las láminas del material compuesto, se consideraron diferentes valores de presión, temperaturas y tiempos de moldeo. La obtención de estas láminas se realizó con enfriamiento acelerado; es decir, se expusieron las láminas directamente a la acción del agua.

La selección de las condiciones de procesamiento en la fase de moldeo del material compuesto se realizó de acuerdo con el procedimiento planteado en el acápite 2.2.1.1. En las Tablas 2.7, 2.8 y 2.9 se indican los valores experimentales de presión, temperatura y tiempo de moldeo empleados para obtener las láminas del material compuesto.

Tabla 2.7. Definición de la presión en la fase de moldeo (P) para obtener el material compuesto.

Presión	Valor (psi)
$P_1$	1.000
$P_2$	3.000
$P_3$	6.000

Tabla 2.8. Temperaturas de las placas de la prensa y del molde consideradas durante la fase de moldeo para obtener láminas de material compuesto.

Ensayo	Ts (°F/°C)	Ti (°F/°C)	Temperatura del molde (°C)
1	370/188	365/185	169,1
2	345/174	340/171	162,5
3	320/160	315/157	136,4

Tabla 2.9. Definición del tiempo en la fase de moldeo (t) para obtener el material compuesto.

Tiempo	Valor (min)
$t_1$	20
$t_2$	15
$t_3$	12

### (ii) Fase de enfriamiento

El enfriamiento del material compuesto se realizó de acuerdo con el procedimiento planteado para la matriz de PLA pura explicada en el acápite 2.2.1.1.

### 2.2.2. SELECCIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE FIBRA DE ABACÁ UTILIZADA EN LOS COMPUESTOS

Se propusieron inicialmente cuatro fracciones volumétricas de fibra: 0,10; 0,13; 0,15 y 0,20, las cuales consistían en fibra corta de 10 mm. Con estas fracciones volumétricas se elaboraron probetas de material compuesto biodegradable y se seleccionaron dos de ellas, para caracterizarlas mecánicamente en el resto del estudio. Dicha selección se realizó en base a evaluaciones visuales, ensayos de tracción y flexión de probetas no normalizadas.

### 2.2.3. OBTENCIÓN DE PROBETAS NORMALIZADAS

Al final del proceso de moldeo por compresión se obtuvieron láminas de la matriz de PLA pura y láminas de material compuesto de dos configuraciones de fibra de concentraciones máximas y mínimas definidas en el acápite 2.2.2. Con estas láminas se fabricaron probetas de tracción, flexión e impacto de acuerdo con los requerimientos de geometría que cada norma indicaba.

La obtención de las probetas a partir de las láminas de las matrices puras y de los materiales compuestos se realizó de acuerdo con el procedimiento que se detalla:

- Se eliminaron los residuos de los extremos de la lámina y se cortaron las partes de la lámina que no tenían un buen acabado.
- Las probetas fueron cortadas de acuerdo con las dimensiones requeridas para los ensayos de tracción, impacto y flexión que se realizaron. Dichas dimensiones se muestran en las Figuras 2.20, 2.21 y 2.22 respectivamente.
- En las probetas para los ensayos de impacto se realizó un proceso de muescado.
- Las probetas cortadas fueron lijadas en los bordes laterales con el uso de una lija número 400, para evitar que existan fisuras o concentradores de esfuerzos.

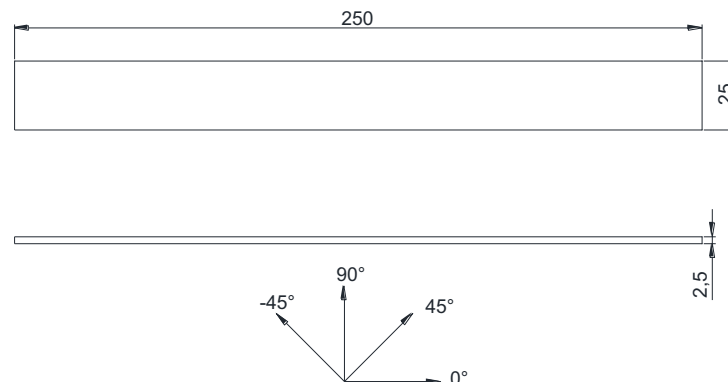


Figura 2.20. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción, según norma ASTM D 3039-08.

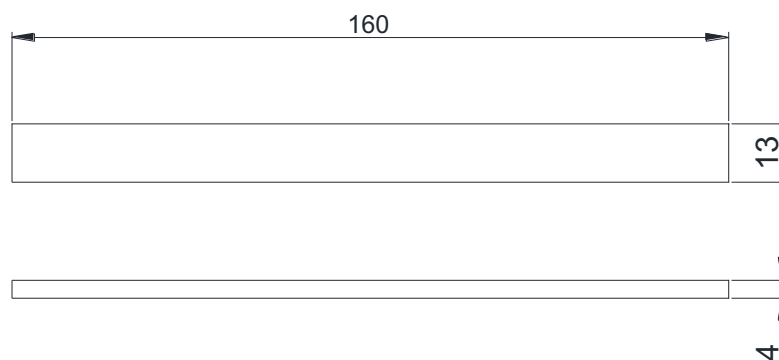


Figura 2.21. Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión, según la norma ASTM D 7264/ -07.

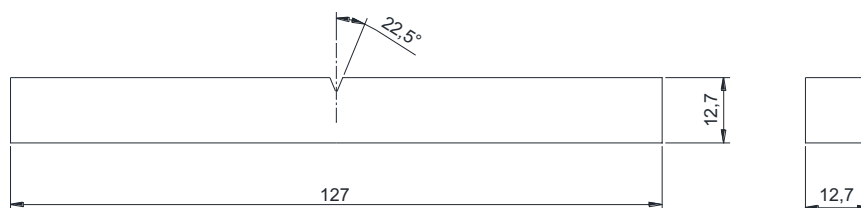


Figura 2.22. Dimensiones de la probeta para determinar la resistencia al impacto, según la norma ASTM D 256-10.

## 2.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS FABRICADAS

Como ya se expuso en el acápite anterior se fabricaron probetas de acuerdo con las especificaciones que cada norma indicaba. En este apartado se presentan los procedimientos seguidos para caracterizar las probetas con la finalidad de obtener sus propiedades mecánicas más importantes.

### 2.3.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ACUERDO CON ASTM D 3039-08

La evaluación de la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación, de la matriz pura de PLA y de los materiales compuestos, se realizó en la máquina universal de ensayos de acuerdo al procedimiento que se detalla:

- Se definieron las condiciones, para realizar el ensayo de tracción en la máquina universal, los mismos que se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Condiciones para el ensayo de tracción en la máquina universal de ensayos.

Parámetro	Valor/Unidades
Velocidad de desplazamiento del cabezal móvil	2 mm/min
Activación del extensómetro	Carrera máx. 50 mm
Programado para grabación de fuerza máxima	(N)
Programado para grabación de cuatro puntos de fuerza y desplazamiento	(N), (mm)



- Se realizó seis mediciones del espesor con la ayuda del medidor de espesores y seis medidas del ancho con el uso del calibrador digital. Finalmente, se hicieron marcas en las probetas, manteniendo una longitud inicial entre las patas del extensómetro igual a 50 mm para la correcta colocación del mismo.
- Las probetas fueron ajustadas en las mordazas de la máquina y se colocó el extensómetro sobre las marcas realizadas en la probeta. Se encendió la máquina y se dio inicio al ensayo.
- En cada probeta se tomó como mínimo 15 datos de carga y deformación.

Por cada fracción volumétrica estudiada, se realizaron 7 probetas para ensayos de tracción de acuerdo con el procedimiento anteriormente descrito. En la Tabla 2.11 se indica la nomenclatura utilizada para marcar a cada una de las probetas tal y como se muestra en la Figura 2.23.

Tabla 2.11. Nomenclatura utilizada para nombrar las probetas ensayadas a tracción.

Nomenclatura marcada en las probetas*	Fracción volumétrica de fibra (%)	Tipo de fibra
PLA puro	----	-----
BC-13-dis-TX	13	Corta-10 mm dispersa
BC-20-dis-TX	20	Corta-10 mm dispersa
BC-13-uni-TX	13	Continua unidireccional
BC-20-uni-TX	20	Continua unidireccional

\*BC: compuesto biodegradable, T: tracción, X: 1-7.



Figura 2.23. Nomenclatura marcada en las probetas para ensayo de tracción.

A partir de los datos de carga y deformación del ensayo de tracción de cada una de las probetas se calcularon las siguientes propiedades.

### (i) Resistencia máxima a la tracción

La resistencia última a la tracción fue calculada de acuerdo con la Ecuación 2. 5.

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad 2.5$$

Donde  $F^{tu}$ : esfuerzo último a la tracción,(MPa),  $P^{max}$ : fuerza máxima antes de la ruptura,(N) y  $A$  : área promedio de la sección transversal de la probeta,(mm<sup>2</sup>).

### (ii) Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad a flexión se calculó de acuerdo con la Ecuación 2.6.

$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad 2.6$$

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

### (iii) Deformación unitaria

La deformación unitaria de las probetas fue calculada de acuerdo con la Ecuación 2.7.

$$\epsilon_i = \delta_i / L_g \quad 2.7$$

Donde  $\epsilon_i$ : Deformación unitaria en el punto i,  $\delta_i$ : desplazamiento del extensómetro en el punto i,  $L_g$  : apertura inicial del extensómetro, 50 mm.

#### 2.3.2. ENSAYO DE FLEXIÓN DE ACUERDO CON ASTM D 7264 -07

El ensayo de flexión se realizó de acuerdo con la prueba tipo A de la norma indicada donde se considera la flexión en dos apoyos simples. En este ensayo se establecieron la resistencia máxima a la flexión, deformación unitaria y el módulo de la elasticidad tanto de la matriz pura de PLA como de los materiales

compuestos. El ensayo se llevó a cabo en la máquina universal de ensayos de polímeros. El procedimiento para el ensayo fue el siguiente:

- Las condiciones del ensayo de flexión en la máquina universal, son los que se detallan en la Tabla 2.10, a excepción de la velocidad del cabezal que fue igual a 1 mm/min (0,025 in/min).
- En diferentes lugares de la probeta se realizaron seis mediciones del espesor con la ayuda del medidor de espesores, seis medidas del ancho con el uso del calibrador digital y se realizó una marca en la parte central de la probeta.
- En la máquina de ensayos fueron colocados los soportes y el puntal para ensayo de flexión. La separación de los soportes se fijó en 129 mm de acuerdo con la norma y posteriormente se puso la probeta sobre los soportes de tal manera que el puntal aplique la fuerza sobre la marca realizada en la parte central de la probeta.
- Se tomaron más de 15 datos de carga y de flexión por cada probeta ensayada.

Por cada fracción volumétrica en estudio, se realizaron 7 ensayos de tracción de acuerdo con el procedimiento descrito. En la Tabla 2.12 se indica la nomenclatura utilizada para marcar a cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 2.12. Nomenclatura utilizada para nombrar las probetas ensayadas.

<b>Nomenclatura marcada en las probetas*</b>	<b>Fracción volumétrica de fibra (%)</b>	<b>Tipo de fibra</b>
PLA puro	----	-----
BC-13-dis-FX	13	Corta-10 mm dispersa
BC-20-dis-FX	20	Corta-10 mm dispersa
BC-13-uni-FX	13	continua unidireccional
BC-20-uni-FX	20	continua unidireccional

\*F: flexión.

A partir de los datos de carga y deformación tomados se calcularon las siguientes propiedades.

**(i) Resistencia máxima a la flexión:**

La resistencia máxima a la flexión fue calculada de acuerdo con la Ecuación 2.8.

$$\sigma = 3PL^3/2bh^2 \quad 2.8$$

Donde  $\sigma$ : resistencia máxima a la flexión, (MPa), P: fuerza máxima aplicada,(N), L: longitud entre apoyos,(mm), b: ancho de la probeta,(mm) y h: espesor de la probeta,(mm).

**(ii) Deformación unitaria:**

La deformación unitaria de las probetas fue calculada de acuerdo con la Ecuación 2.9.

$$\epsilon = 6\delta h/L^2 \quad 2.9$$

Donde  $\epsilon$ : deformación unitaria máxima,(mm/mm) y  $\delta$ . Deflexión en la probeta,(mm).

**(iii) Módulo de elasticidad a flexión:**

El módulo de elasticidad a flexión se calculó de acuerdo con la Ecuación 2. 10.

$$E = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad 2. 10$$

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

### 2.3.3. ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO CHARPY DE ACUERDO CON ASTM D 256- 10

Para el análisis de la resistencia al impacto de la matriz pura de PLA y de los materiales compuestos se utilizó la máquina de impacto y el procedimiento que se siguió se detalla en los siguientes puntos:

- Se realizó la prueba en vacío para definir las pérdidas de energía por rozamiento con el aire.
- Se realizaron pruebas preliminares para establecer la energía aproximada que absorbía el material y definir si se requería colocar un peso adicional en el péndulo de la máquina.
- Se tomó un dato de energía absorbida por cada probeta ensayada en Joules.
- Por cada fracción volumétrica en estudio se realizaron 14 ensayos de impacto de acuerdo con el procedimiento descrito. En la Tabla 2.13 se indica el tipo de material compuesto elaborado.

Tabla 2.13. Nomenclatura utilizada para nombrar las probetas ensayadas.

Nomenclatura marcada en las probetas	Fracción volumétrica de fibra (%)	Tipo de fibra
PLA puro	----	-----
BC-13-dis- $I_{s,c}X$	13	Corta-10 mm dispersa
BC-20-dis- $I_{s,c}X$	20	Corta-10 mm dispersa
BC-13-uni- $I_{s,c}X$	13	Continua unidireccional
BC-20-uni- $I_{s,c}X$	20	Continua unidireccional

Donde  $I_{s,c}$ : probetas con muesca o sin muesca.

#### 2.3.4. DENSIDAD DE LOS MATERIALES ELABORADOS

Para el análisis de la densidad de los materiales compuestos se siguió el siguiente procedimiento:

- Se elaboraron láminas de material compuesto con las fracciones definidas de 13 y 20 %.
- Se realizaron 25 medidas del largo, ancho y del espesor de cada una de las láminas de material compuesto obtenido.
- Se pesaron cada una de las láminas elaboradas.
- Se calculó la densidad del material compuesto de acuerdo con la Ecuación 2.11, con los valores promedio de los datos experimentales.

$$\rho = m/V \quad 2.11$$

Donde  $\rho$ : densidad: PLA, material compuesto, ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $m$ : masa de las láminas, (g) y  $V$ : volumen de la lámina, ( $\text{cm}^3$ ).

#### 2.4. PARÁMETROS DE SELECCIÓN DEL PROTOTIPO

En este apartado se describe el procedimiento llevado a cabo para definir el prototipo a fabricarse. Al mismo tiempo se establecieron los procesos de fabricación necesarios para elaborarlo. Inicialmente se ejecutó un análisis funcional del material, lo cual permitió reconocer las fortalezas y debilidades del mismo. Seguidamente, se plantearon diferentes opciones del producto a realizarse. Esto estuvo acorde a los resultados obtenidos en el análisis del material. Posteriormente, se compararon las diferentes alternativas mediante el método ordinal de criterios ponderados, hasta obtener el producto más adecuado. Finalmente, se describió la metodología y los procesos de fabricación llevados a cabo para obtener el producto.

##### 2.4.1. ANÁLISIS FUNCIONAL DEL MATERIAL

Este análisis prospectivo o de oportunidades se lo realizó gracias a la experiencia alcanzada después del moldeo y caracterización de los materiales elaborados.

Por esta razón, se listan diferentes propiedades y el comportamiento del PLA frente a estas.

**(i) Biodegradabilidad:** El PLA posee excelentes propiedades de biodegradación en ambientes de compostaje. A temperaturas mayores a los 60 °C y humedades relativas de 80% o más, su biodegradación dura entre una semana y un mes. Sin embargo, todavía no existen estudios para conocer el cambio en estos tiempos de degradación en materiales reforzados con fibra de abacá.

**(ii) Apariencia del material:** El PLA en su estado natural tiene buenas propiedades de transparencia por lo que ha sido utilizado como films para empaquetamiento de productos. Sin embargo, al momento de adicionar las fibras naturales estas tienden a cambiar la fisonomía y apariencia del material.

**(iii) Resistencia del material:** Como resultado de la caracterización de materiales compuestos se obtuvo diferentes configuraciones de refuerzo de fibra, las mismas que mejoraron las propiedades mecánicas de la matriz de PLA. Esto puede observarse en el acápite 3.1.4.

**(iv) Trabajabilidad:** como se ha explicado anteriormente, el método de procesamiento de los materiales compuestos y del prototipo es el moldeo por compresión, donde se utiliza una prensa de placas calefactoras; por ello, tanto el proceso como los equipos constituyen una limitante. En este caso el moldeo por compresión ha sido diseñado para productos donde no se necesitan configuraciones geométricas muy complicadas y donde la aplicación de calor pueda ser uniforme a lo largo de todo el cuerpo del producto y los moldes no tengan diseños muy complicados.

**(v) Costo del material:** el costo de adquirir ácido poliláctico es bastante alto. El valor de la materia prima en promedio duplica el costo de adquisición de polímeros como el PP o el PET. A su vez, el método de procesamiento del material impide el trabajo de grandes cantidades de producción aumentando el valor de los posibles productos.

**(vi) Trabajo en altas temperaturas:** como se trata de un material biodegradable este no debe trabajar a temperaturas extremas; ya que si el material se encuentra en un medio de altas temperaturas va a sufrir degradación

acelerada y su periodo de vida y resistencia mecánica disminuyen considerablemente.

**(vii) Durabilidad del material:** de acuerdo a estudios realizados e información del proveedor el ácido poliláctico tiene una vida útil de 10 años a condiciones ambientales normales ( $T < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\text{HR} < 80\%$ ); por lo tanto los productos que se debían elaborar en este material entran en los de uso de desechable o de vida media.

**(viii) Inflamabilidad:** como se mencionó anteriormente el PLA no cumple con los requerimientos mínimos expuestos en la norma americana UL94. Sin embargo, en comparación a otros polímeros posee mejores propiedades retardantes de fuego.

**(ix) Versatilidad de color:** en ciertas aplicaciones el color que se le pueda dar al producto es muy importante para el cliente, pero en el caso de los materiales obtenidos esta es una limitación importante, ya que en las técnicas de procesamiento del material no se tomó en cuenta este factor; consecuentemente, los productos tienen el color natural del PLA y de los refuerzos de las fibras de abacá.

**(x) Geometría y tamaño:** la geometría y el tamaño no son una limitante del material; pero es necesario tomarlas en cuenta ya que las placas de la prensa calefactora impiden moldear materiales de gran tamaño. Los cuerpos pueden tener una geometría no mayor a  $250 \times 250\text{ mm}$ . Además que los espesores mínimos fabricables de material compuesto están en el orden de  $1,0\text{ mm}$ .

**(xi) Toxicidad:** no se trata de un material tóxico, en contacto con el cuerpo humano tiende a degradarse y ser absorbido por el organismo.

**(xii) Comportamiento frente a la humedad:** su naturaleza hidrofóbica hace que el material se resista a la absorción de agua. Sin embargo, frente a otros polímeros como el PET y los refuerzos de fibra, su capacidad de absorción de humedad son relativamente buenas.

**(xiii) Resistencia a agentes de limpieza:** el material puede limpiarse con cualquier tipo de detergentes o químicos de limpieza habituales sin sufrir un daño permanente o pérdida de propiedades o apariencia.



#### 2.4.2. COMPARACIÓN ENTRE POSIBLES PROTOTIPOS A REALIZARSE

De acuerdo al análisis del material muchas aplicaciones del PLA no pueden ser tomadas para realizar el prototipo del presente estudio. Sin embargo, se obtuvieron varias alternativas para la elaboración del prototipo las cuales fueron sometidas al método ordinal de criterios ponderados para escoger a la mejor entre diferentes opciones. Así, después de una visita de campo a tiendas, restaurantes y locales de venta de plásticos se escogieron los productos que se presentan en la Tabla 2.14 como alternativas de producción con la matriz y los materiales compuestos.

##### **Método ordinal de criterios ponderados**

Este análisis es una adaptación del método ordinal de criterios ponderados utilizado en el diseño concurrente. De esta forma, es posible seleccionar la mejor alternativa de las opciones propuestas. Además, se establecieron los siguientes criterios de selección:

**Costo:** el producto debido a su matriz biodegradable y el método de procesamiento artesanal es de alto costo; por lo tanto se debe buscar un producto que utilice la menor cantidad de material y tiempo de procesamiento, para así disminuir el costo de fabricación.

**Facilidad de conformación:** se debe buscar un producto que presente facilidades al momento de realizar el molde y reproducir el proceso de elaboración. A pesar de que todos los productos son manufacturables se debe tomar en cuenta aquellos que permitan un diseño de un molde simple y que puedan ser fabricados con los equipos que se cuentan en el laboratorio.

**Resistencia:** se debe tomar en cuenta que en el desarrollo del presente estudio se obtuvieron diferentes materiales de diferentes características mecánicas; por ese motivo el producto debe aprovechar cada una de esas características mecánicas.

**Vida útil:** como se trataba de un material biodegradable el producto no puede ser diseñado para durar más de 8 años en uso. Además, debe tomarse en cuenta que

la duración tampoco debe ser muy corta, por lo que no debe estar expuesto a la acción de agentes ácidos, ambientes excesivamente húmedo.

**Ambiente de trabajo:** se debe tomar en cuenta las limitaciones que el material presenta para trabajos en altas temperaturas o ambientes hostiles. El producto no puede trabajar en ambientes con temperaturas mayores a los 60°C.

**Facilidad de aplicación ecológica:** como la principal característica del material es su biodegradabilidad y ser amigable con el ambiente, es necesario que el producto a realizarse sea susceptible de una línea medio ambiental y que sea aceptado por los comparadores.

### 2.4.3. OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO

De acuerdo al análisis anterior se determinó que la mejor opción para realizar el prototipo es la alternativa referente a cajas para recuerdos o empaque de productos, ya que en el caso de cajas de recuerdos el costo de la caja puede ser asumido por el producto. En cambio para el empaque de productos los recipientes pueden venderse con la idea de productos ecológicos y amigables con el ambiente donde los consumidores están dispuestos a pagar más. Por lo tanto, en este acápite se describen todos los procesos realizados en el estudio para obtener el producto final. Todo este proceso fue llevado a cabo siguiendo los pasos definidos en el procedimiento para el prototipo descrito en la Figura 2.24.

#### 2.4.3.1. Pruebas preliminares

Los ensayos preliminares consistieron en realizar pruebas de moldeo tanto en láminas de matriz pura de PLA como en láminas de material compuesto, las mismas que fueron obtenidas a través de los procedimientos detallados anteriormente en el estudio. Una vez obtenidas las láminas, estas fueron sometidas a la acción de calor para verificar la temperatura a la que el material puede ser moldeable sin sufrir grandes daños en la superficie del material.

Tabla 2.14. Alternativas propuestas para la elaboración del prototipo.

Alternativa	Descripción	Producto existente en el mercado
A1	Plato para servir postres en restaurantes, heladerías.	
A2	Cajas para recuerdos o empaque de productos.	
A3	Bandeja para servir frutas, paneras, ensaladas, salsas, cubiertos.	
A4	Cacerola para mantener comida guardada.	

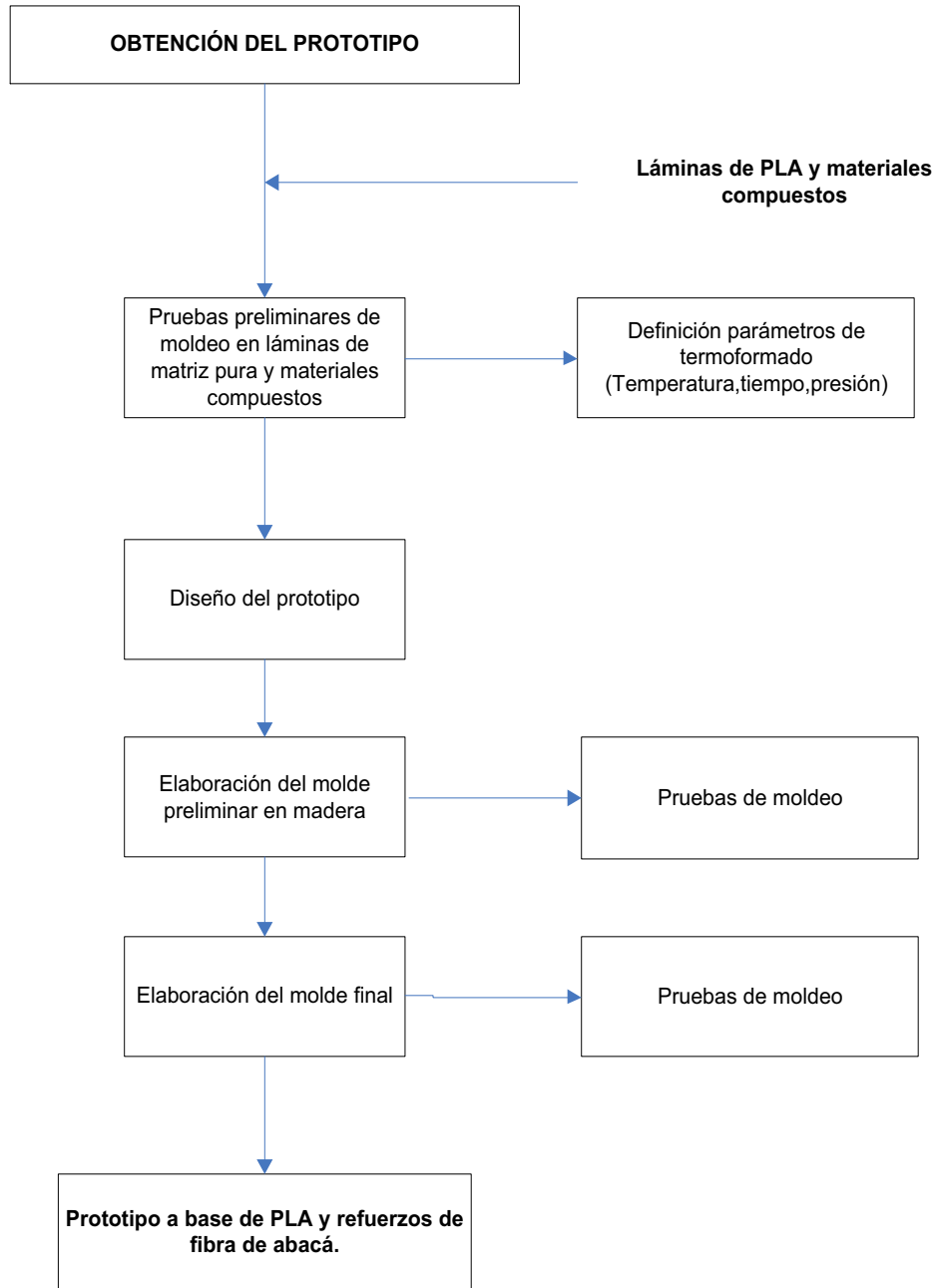


Figura 2.24. Procedimiento aplicado para la obtención de los productos a base de PLA y materiales compuestos.

Este proceso de clentamiento se llevó a cabo colocando las láminas de material sobre la placa inferior de la prensa calefactora calentada con anterioridad. El aumento de la temperatura fue medido a través de una termocupla y a su vez con una pinza se verificó el comportamiento del material mientras la temperatura iba en aumento. Finalmente, la lámina moldeable fue retirada y con la ayuda de matrices simples plásticas se intentó dar diferentes formas al material.

#### 2.4.3.2. Diseño y proceso de fabricación del prototipo

A partir de las pruebas preliminares se llegó a la conclusión que los materiales compuestos podían tomar la forma necesaria para elaborar las cajas planteadas en el análisis previo a la obtención del prototipo. Por lo tanto, se inició con el proceso de diseño del prototipo basándose en cajas de recuerdo existentes y tratando de tomar en cuenta posibles innovaciones que hicieran al producto diferente.

Se tomaron en cuenta las siguientes pautas para el diseño del prototipo:

- La apariencia del producto no debe ser idéntica a las cajas ya existentes
- Debe dejar en evidencia las principales propiedades del material
- Su tamaño debe cumplir al menos con las características de los productos existentes
- Debe tener algún atractivo especial para el posible consumidor de los mismos
- Se debe aprovechar las propiedades mecánicas de los materiales

Tomando en cuenta estos requerimientos se elaboró un molde de madera preliminar con el cual se llevaron a cabo ensayos de termoformado con la matriz de PLA y con materiales compuestos reforzados con fibra de abacá. Con estos resultados se diseñó y construyó un molde de acero para elaborar el producto planificado. En la Figura 2.27 se presenta el proceso de fabricación llevado a cabo para elaborar el prototipo final a base de láminas de PLA y material compuesto. Este proceso inició con la elaboración de láminas de material. Posteriormente, estas láminas fueron calentadas (Figura 2.25) hasta su estado de moldeabilidad con la plancha fijada en diferentes temperaturas hasta alcanzar la más adecuada. A continuación, estas fueron termoformadas con el molde de acero diseñado y construido para el este estudio, el mismo que fue adaptado en la máquina universal de ensayos, como se muestra en la Figura 2.26.



Figura 2.25. Calentamiento de las láminas.

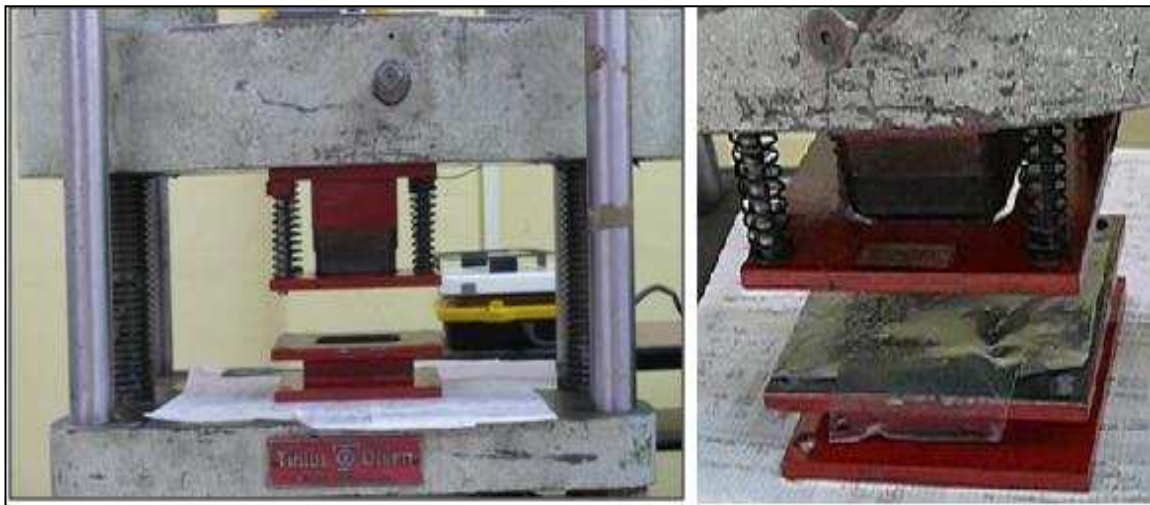


Figura 2.26. Termoformado de las láminas con el molde de acero ensamblado en la máquina universal de ensayos.

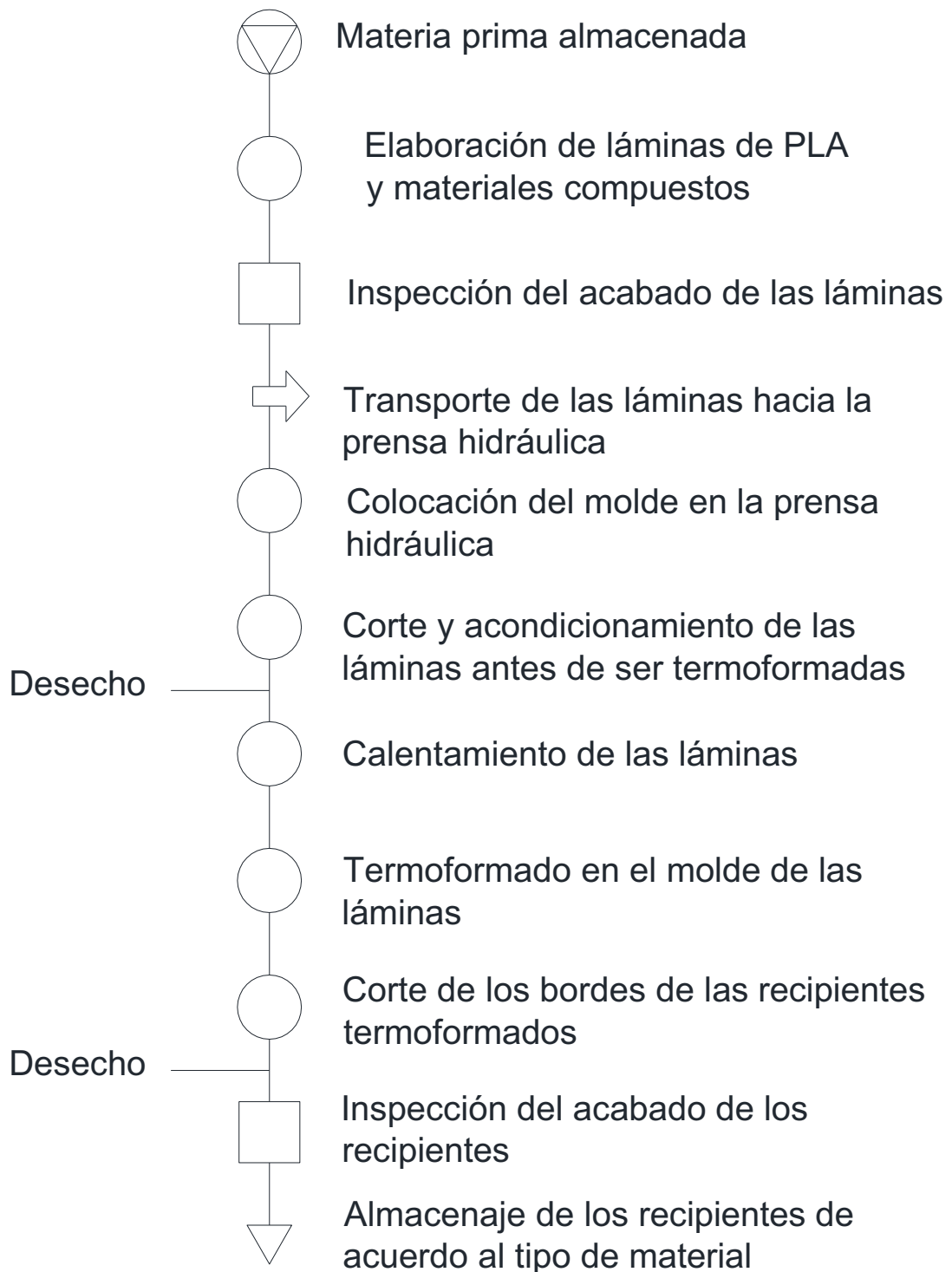


Figura 2.27. Diagrama de procesos para la elaboración del prototipo.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la experimentación detallada en el Capítulo 2. Se exponen los resultados logrados después de llevada a cabo la estrategia metodológica definida para la selección de los parámetros de moldeo más eficaces. Seguidamente, se presentan y discuten los resultados de la caracterización mecánica de las probetas normalizadas elaboradas con los materiales. De estos resultados se obtuvo que tanto la matriz de PLA como los materiales compuestos reforzados con fibra, tienen un comportamiento esencialmente frágil y que la mejor configuración de fibra fue la continua unidireccional con un porcentaje de fracción volumétrica del 20%. Debido a que tanto sus propiedades a tracción, flexión e impacto fueron superiores a los valores obtenidos en la matriz. Finalmente, se muestra el prototipo fabricado utilizando los materiales obtenidos en el estudio, dando como resultado espesores de láminas que pueden ser termoformados tanto de matriz pura como de materiales compuestos.

#### 3.1. ENSAYOS PRELIMINARES

Después de haber secado tanto el PLA como la fibra de abacá de acuerdo con lo descrito en el acápite 2.2.1, los tiempos de secado aplicados son los mostrados en la Tabla 3.1. Estos tiempos se definieron para una programación en la estufa de 70°C y se basaron en la recopilación bibliográfica realizada. Cabe señalar que estos tiempos podían variar si la temperatura en la estufa se aumentaba o disminuía, de acuerdo a los valores señalados en Tabla 1.8.



Tabla 3.1. Tiempos de secado de insumos.

Insumo	Tiempo de secado (h)
Ácido Poliláctico (PLA)	2,0
Fibra natural (dispersa 10 mm)	4,0
Fibra natural (continua unidireccional)	12,0

Para el caso de las pruebas con el molde fabricado de acero A-36, se comprobó que el acabado superficial incidía directamente en la calidad de las láminas obtenidas; por ello se rectificaron las placas y posteriormente se lijaron manualmente sus superficies. Este proceso de lijado se muestra en la Figura 3.1, el cual se realizó de forma circular y constante por toda la superficie de las placas, con lijas de numeración 100 y 200. Debido a no contar con un rugosímetro, no se pudo definir el valor necesario de acabado superficial del molde. Por lo tanto, solamente se lijó las partes hasta que desaparezcán rayas muy profundas en las paredes del molde. Además, se evidenció que los moldes no estaban diseñados adecuadamente para el desmoldeo de las láminas, generando en el peor de los casos la rotura de la lámina elaborada.



Figura 3.1. Lijado de las paredes del molde para mejorar el acabado superficial.

### 3.1.1. PARÁMETROS ADECUADOS PARA EL MOLDEO POR COMPRESIÓN DE LÁMINAS DE PLA

La obtención de las láminas de ácido poliláctico puro se realizó de acuerdo con el procedimiento planteado en el acápite 2.2.1.1 y cuyo proceso completo se muestra en el ANEXO 3. El precalentamiento inicial del molde, en la prensa calefactora por un tiempo aproximado de 60 s, permitió la evaporación de restos de agua debidos a usos anteriores del mismo y la minimización de las fallas en las láminas del material. A su vez, la colocación ordenada de los pellets, dentro de la hembra del molde, como se presenta en la Figura 3.2 (a) permitió una distribución más homogénea de calor y de presión sobre el molde, evitando obtener láminas defectuosas sin fusión completa de los pellets a lo largo de toda la geometría, como se muestra en la Figura 3.2 (b).

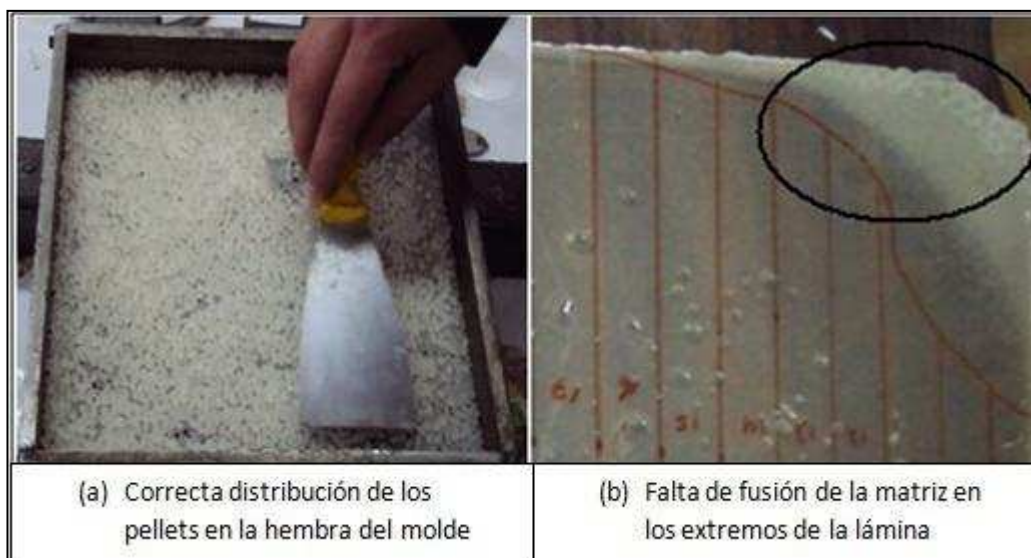


Figura 3.2. (a) Distribución correcta de los pellets, (b) fallas producidas por la falta de fusión de los pellets.

#### (i) Fase de moldeo

En el primer proceso se definieron los valores de presión a aplicarse en la fase de moldeo, los mismos que se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Presiones aplicadas a lo largo del moldeo de PLA.

Material	Espesor de lámina (mm)	Presión constante aplicada (psi)	Norma
<b>Ácido Poliláctico (PLA)</b>	2,50	6.000	ASTM D 3039-08
	4,00	6.000	ASTM D 7264-07
	> 6,35	6.000	ASTM D 256-10

Para presiones menores a 6.000 psi se obtuvieron láminas con falta de fusión en los extremos, ya que no se tenía una correcta distribución del calor al momento de la fusión del PLA, La Figura 3.3 muestra la falta de fusión en el extremo de una lámina de PLA elaborada.

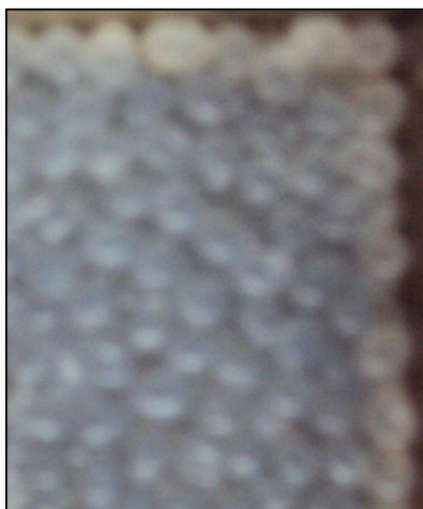


Figura 3.3. Presencia de pellets no fusionados en los extremos de la lámina.

Una vez obtenida la presión constante de moldeo se lograron las temperaturas más adecuadas a programar en las placas calefactoras de la prensa, las mismas que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Temperaturas aproximadas fijadas en la prensa.

Material	Espesor de lámina (mm)	Temperatura fijada en las placas de la prensa (°F)	
		Ts	Ti
Ácido Poliláctico (PLA)	2,50	345	340
	4	345	340
	> 6,35	345	340

Al igual que con las presiones de trabajo con el fijado de temperaturas menores a las establecidas en la Tabla 3.3 se consiguieron láminas con falta de fusión en los extremos. Por contrario, al fijar temperaturas mayores a las expuestas, las láminas obtenidas de PLA presentaban fallas superficiales e internas a lo largo de la geometría de la lámina, tal y como se indica en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Fallas superficiales e internas del PLA por exceso de temperatura de procesamiento.

Finalmente, como último parámetro se obtuvieron los tiempos más adecuados de moldeo que se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Tiempos aproximados de moldeo de PLA.

<b>Material</b>	<b>Espesor de lámina (mm)</b>	<b>Tiempo aproximado (s)</b>
<b>Ácido Poliláctico (PLA)</b>	1	480
	2,5	600
	4	720
	> 6,35	780

Con menores tiempos de moldeo se obtuvieron láminas con pellets fundidos de manera incompleta. Este aspecto se presentó a lo largo de la geometría de la lámina de ácido poliláctico. Es necesario remarcar que la persona encargada de realizar el moldeo debe estar atenta con los tiempos de moldeo con la finalidad de evitar la pérdida excesiva de material por los bordes del molde.

Como complemento, debido a que en ciertas pruebas preliminares se obtuvieron probetas con gran cantidad de burbujas internas, como se muestra en la Figura 3.5, se determinó que este tipo de fallas se evitan con la apertura del molde en medio del proceso de moldeo (calentamiento), antes de que el material llegue a la temperatura de fusión. Por lo tanto, se debe medir con una termocupla y antes que la lectura sobrepase los 140 °C se puede abrir el molde para la salida de las burbujas. Esta apertura permite también reacomodar el material a lo largo del molde para conseguir láminas más uniformes. Este proceso se muestra en la Figura 3.6 .

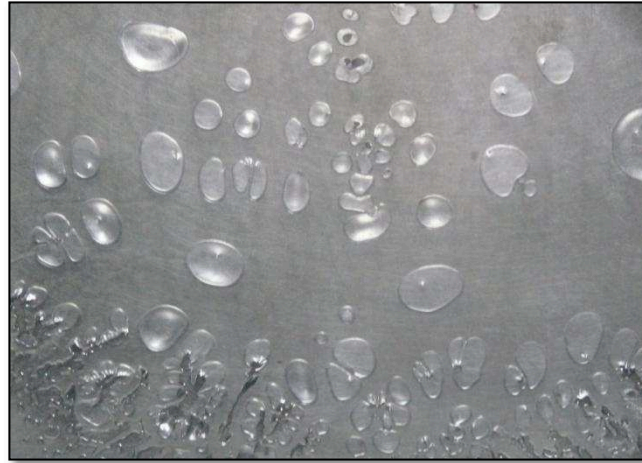


Figura 3.5. Lámina de PLA con abundantes poros internos.

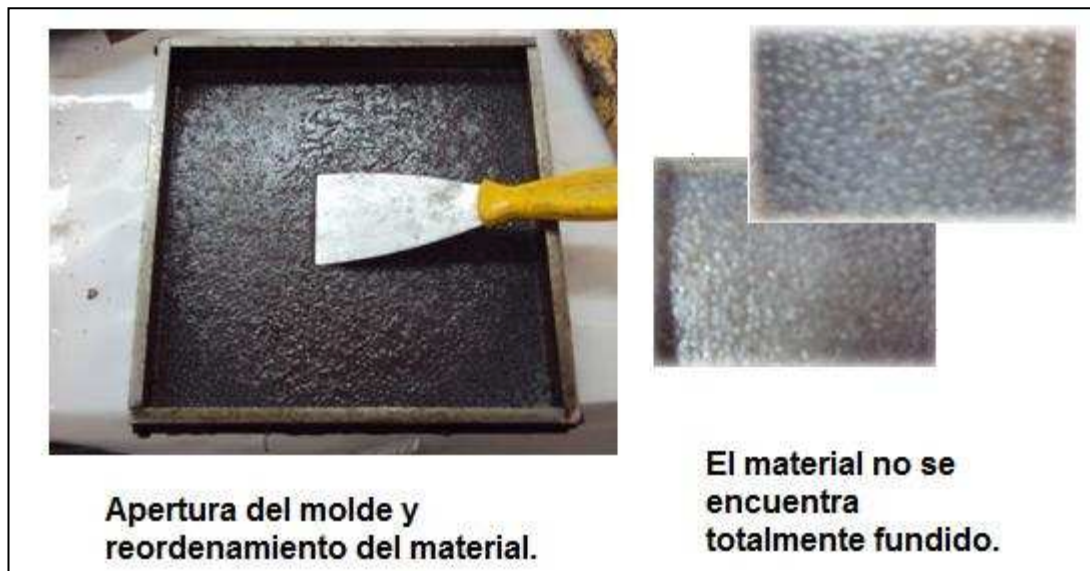


Figura 3.6. Apertura del molde en la fase de moldeo.

## (ii) Fase de enfriamiento

**Enfriamiento a temperatura ambiente:** Se determinó que este enfriamiento toma un tiempo prolongado (3 horas); además, se obtuvieron láminas pandeadas, como se muestra en la Figura 3.7. Esto se debe a que en este periodo de tiempo el molde tiende a perder la presión aplicada en el proceso de moldeo generando una acumulación de esfuerzos internos en la lámina; por lo tanto se pierde la forma y propiedades requeridas para la posterior obtención de las probetas a caracterizar.



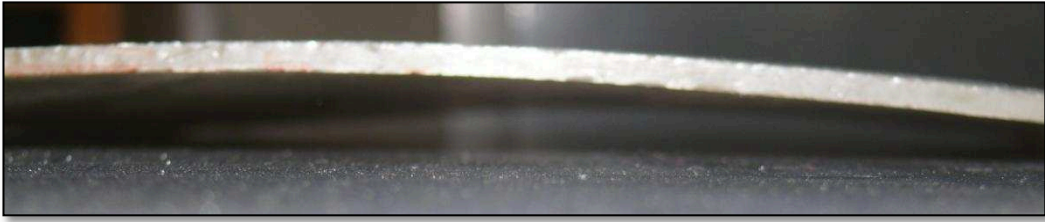


Figura 3.7. Lámina de ácido poliláctico pandeada por el enfriamiento a temperatura ambiente.

**Enfriamiento lento:** Este proceso tomó 15 minutos aproximadamente. Los principales problemas se generaron debido a que el enfriamiento no se produjo de manera uniforme sobre la superficie de la lámina. Es así, que el material contenía esfuerzos residuales y en la mayoría de pruebas realizadas se fracturaba durante el desmoldeo. Esto se muestra en la Figura 3.8.

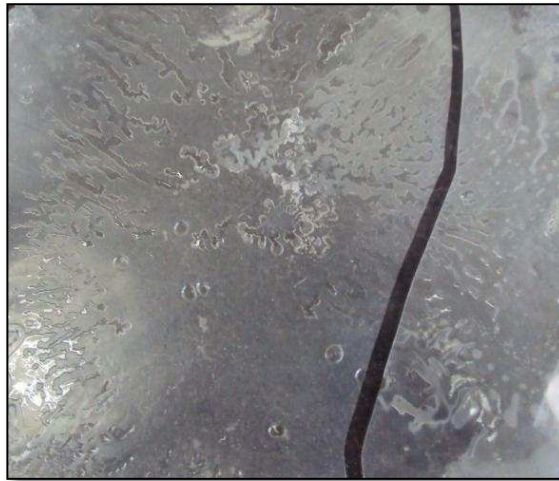


Figura 3.8. Lámina de ácido poliláctico fracturada al momento de desmoldarse.

**Enfriamiento acelerado:** Este enfriamiento resultó ser el más rápido y aquel que permitió obtener láminas sin las fallas expuestas anteriormente. Sin embargo, las láminas todavía evidenciaban presencia de burbujas internas mínimas. Por lo tanto, debido a la necesidad de producir la mayor cantidad de láminas de PLA puro se utilizó este tipo de enfriamiento para producir las láminas que posteriormente se utilizaron en el moldeo tipo sánduche de materiales compuestos.

**Enfriamiento lento con aplicación de presión:** Este enfriamiento resultó ser el más adecuado para obtener las láminas de una buena calidad superficial, libres

casi en su totalidad de burbujas internas en el material. La presión aplicada durante el enfriamiento fue de 1.000 psi y este tipo de enfriamiento se utilizó para obtener las láminas de PLA puro y láminas de material compuesto. En la Figura 3.9 se muestra la prensa utilizada para el enfriamiento con aplicación de presión.



Figura 3.9. Prensa utilizada en el enfriamiento lento con aplicación de presión.

### 3.1.2. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE MATERIAL COMPUESTO

La obtención de las láminas de material compuesto se realizó de acuerdo con el procedimiento planteado en el acápite 2.2.1.2 y cuyo proceso completo se muestra en el ANEXO 3. La elaboración de materiales compuestos se realizó teniendo en cuenta su caracterización mecánica. Es decir, se tuvo presente que existan las condiciones necesarias para la posterior extracción de probetas normalizadas. En la Tabla 3.5 se presentan las cantidades de material y fibra que se utilizaron dependiendo de las probetas y el ensayo para las que fueron fabricadas. Estos valores fueron calculados con los valores de densidad del PLA ( $1,24 \text{ g/cm}^3$ ) y la fibra de abacá ( $1,3 \text{ g/cm}^3$ ).



Tabla 3.5. Cantidad de material y fibra.

Espesor de la lámina (mm)	Ensayo	Fracción volumétrica de fibra	Cantidad de material	
			Ácido Poliláctico (g)	Fibra de abacá (g)
2,5	Tracción	20%	140,47	36,82
4,0	Flexión		224,75	58,91
6,4	Impacto		356,79	93,51
2,5	Tracción	13%	152,76	23,93
4,0	Flexión		244,41	38,29
6,4	Impacto		388,01	60,78

El proceso de obtención del material compuesto parte de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares para la elaboración de matriz de PLA, donde la mayoría de procesos y subprocesos fueron similares. Se tomó en cuenta solamente aquellas fases donde el procedimiento difiere del ya presentado para la matriz pura.

#### (i) Fase de moldeo

Inicialmente al igual que para la matriz de PLA se definieron las presiones de moldeo las mismas que se presentan en la Tabla 3.6 se observa que las presiones definidas son menores a las utilizadas en el moldeo de la matriz. Esto se debe a que cuando se aumentaba a una presión mayor a los 3.000 psi en la prensa, es decir valores como 6.000 psi, se obtenían láminas donde la matriz no cubría a toda la fibra a lo largo de la geometría. Además, se provocaba salida de material a lo largo de los bordes del molde existiendo zonas donde todavía no existía una fusión completa entre la matriz y la fibra, como se muestra en la Figura 3.10. Esta presión definida fue ejercida para todos los espesores de lámina que se deseaba obtener, ya que no se evidenció ningún efecto negativo para ningún espesor.

Tabla 3.6. Presiones definidas para el moldeo de materiales compuestos.

Espesor de la lámina (mm)	Ensayo	Fracción volumétrica de fibra	Cantidad de material		Presión aplicada (psi)
			Ácido Poliláctico (g)	Fibra de abacá (g)	
2,5	Tracción	20%	140,47	36,82	3.000
4,0	Flexión		224,75	58,91	3.000
6,4	Impacto		356,79	93,51	3.000
2,5	Tracción	13%	152,76	23,93	3.000
4,0	Flexión		244,41	38,29	3.000
6,4	Impacto		388,01	60,78	3.000



Figura 3.10. Láminas de material compuesto con zonas donde la fibra no está cubierta por la matriz completamente.

Seguidamente, se definieron las temperaturas a programarse en la prensa calefactora. Estas temperaturas resultaron ser las mismas definidas para el moldeo de la matriz, presentadas en la Tabla 3.3. Cuando se programaban temperaturas mayores en las placas de la prensa ( $T_{s,i} > 365^{\circ}\text{F}/185^{\circ}\text{C}$ ), se obtenían láminas con coloraciones blanquecinas en algunos sectores de la lámina. De acuerdo con otros estudios, estas coloraciones blanquecinas se forman cuando el PLA ha sido tratado con diferentes solventes orgánicos como el tolueno, acetona y el etil acetato, y que los cambios son identificados como movimientos restringidos en los grupos C-O-C que aparecen en el rango 1.225 a 1.090 del espectro infrarrojo del PLA, tomado a partir de un análisis FTIR (Fourier transform

infrared spectroscopy).<sup>60</sup> El material moldeado fue analizado en espectrofotómetro de infrarrojo (FTIR). Se consideraron probetas fabricadas de las láminas obtenidas con regiones blanquecinas y láminas en buen estado, sin encontrar una diferencia considerable entre los espectros de los análisis, como se muestra en la Figura 3.11. Además, en la Figura 3.12 se presenta una lámina con estas coloraciones blanquecinas en la superficie.

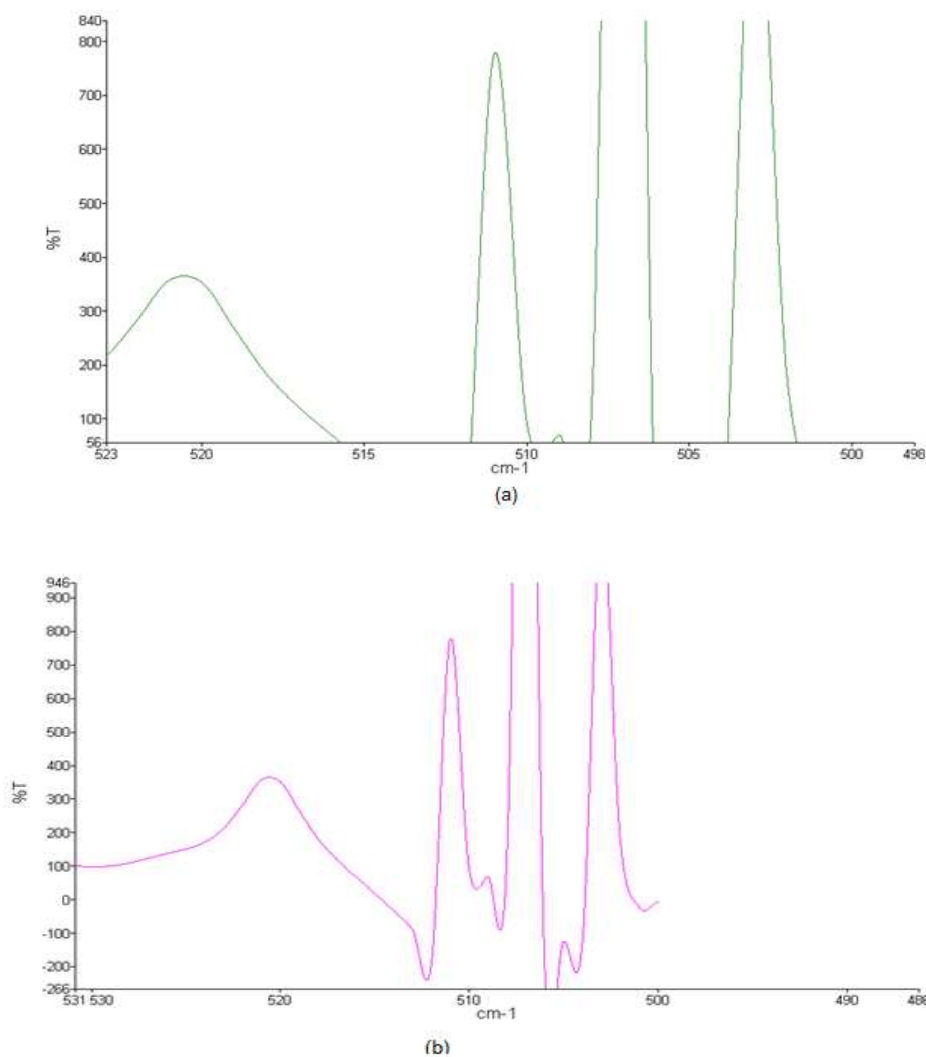


Figura 3.11. a) Espectroscopia infrarroja de una muestra de PLA puro sin zonas afectadas b) Espectroscopia infrarroja de una probeta obtenida de las zonas blanquecinas de una lámina de material compuesto.

<sup>60</sup> AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010; p:101.



Figura 3.12. Láminas de material compuesto con zonas donde la matriz ha sufrido degradación.

Finalmente, una vez definidas las presiones y temperaturas en la prensa se obtuvieron los tiempos de moldeo que se exponen en la Tabla 3.7. Estos tiempos aumentaban de acuerdo al incremento del espesor de lámina que se quería obtener, ya que se debía moldear mayor cantidad tanto de matriz de PLA como de fibra de abacá.

Tabla 3.7. Tiempos de moldeo de materiales compuestos.

<b>Material</b>	<b>Espesor de lámina (mm)</b>	<b>Tiempo aproximado (s)</b>
<b>Material Compuesto</b>	2,5	720
	4,0	840
	6,4	960

### **(ii) Fase de enfriamiento**

El método de enfriamiento para las láminas de material compuesto fue el enfriamiento lento con aplicación de presión definido en el acápite 2.2.1.1. Como resultado se obtenían láminas con buenas características tanto superficiales como en la dispersión de la fibra en la matriz. En la Figura 3.13 se muestra una lámina obtenida aplicando dichos parámetros obtenidos.







Figura 3.13. Láminas de material compuesto de matriz de ácido poliláctico reforzada con fibra natural (dimensiones de las láminas 239 x 239 mm<sup>2</sup>).

### 3.1.3. SELECCIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE FIBRA DE ABACÁ UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE LOS COMPUESTOS

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados obtenidos después de la inspección visual realizada sobre las láminas elaboradas a diferentes concentraciones volumétricas con fibra dispersa corta de 10 mm. Principalmente, en esta inspección visual se revisó la distribución de la fibras en la matriz donde el valor mínimo de adición de fibra es 0,13 y el valor máximo 0,20 en fracción volumétrica.



Tabla 3.8. Inspección visual para definir las fracciones máximas y mínimas de fibra a añadir en la matriz.

Fracción volumétrica	Inspección Visual	Imágenes provenientes de láminas de 239 x 239 mm <sup>2</sup>
20%	Es la máxima fracción de fibra que soporta la matriz. La fibra se distribuyó uniformemente a lo largo de la lámina.	 <p data-bbox="986 790 1353 824">Imagen aprox. 190 x 110 mm<sup>2</sup></p>
15%	Distribución uniforme de la fibra en la lámina.	 <p data-bbox="986 1193 1353 1227">Imagen aprox. 190 x 100 mm<sup>2</sup></p>
13%	Se observaron fallas en los extremos de la placa, pero en general existió una muy buena distribución de la fibra.	 <p data-bbox="986 1608 1353 1641">Imagen aprox. 150 x 100 mm<sup>2</sup></p>
10%	Hubo acumulación de la fibra en ciertas zonas; mientras que en otras no existía fibra que ocupara la matriz.	 <p data-bbox="1002 2000 1337 2033">Imagen aprox. 90 x 60 mm<sup>2</sup></p>

Para el caso de los ensayos no normalizados de tracción y flexión los resultados se grafican en las Figuras 3.14 y 3.15. Se consideraron los resultados con valores máximos. Es importante recalcar que los valores presentados en las gráficas son netamente referenciales, ya que no se utilizó ni el número mínimo de probetas ni las dimensiones establecidas en una norma para validar estos resultados. Por lo tanto, estos datos solamente permiten evidenciar cuando la diferencia de los valores es grande, como en el caso de la fracción volumétrica del 10 vol%, que para los dos ensayos presentó propiedades sumamente bajas. Dicho esto, no se puede afirmar que el porcentaje de fracción volumétrica del 15 vol% tiene menores propiedades que la de 13 vol%.

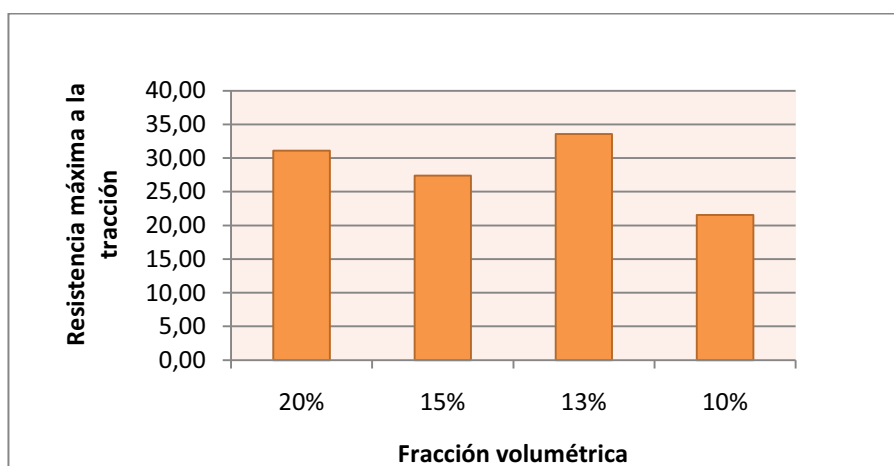


Figura 3.14. Resistencia a la tracción vs. porcentaje de fracción volumétrica de fibra dispersa de 10mm.

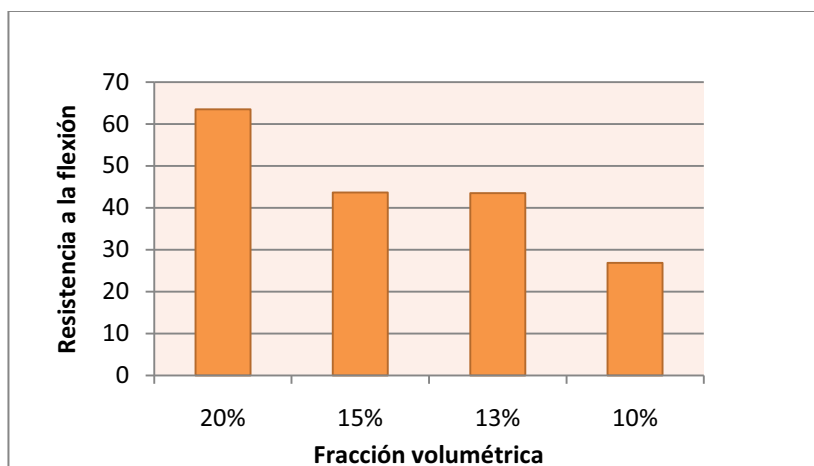


Figura 3.15. Resistencia máxima a la flexión vs. porcentaje de fracción volumétrica de fibra dispersa de 10 mm.

De acuerdo a la inspección visual realizada y los resultados obtenidos en las pruebas no normalizadas, se escogió a las fracciones volumétricas de 20 vol% y 13 vol% como los porcentajes de fracción volumétrica máximos y mínimos para elaborar las láminas de donde posteriormente se obtuvieron las probetas a caracterizar. Se descartó las de 10 vol% ya que como se observa en los resultados no presenta buenas características mecánicas y además no existe cantidad suficiente de fibra para cubrir a toda la matriz de PLA.

#### **3.1.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS OBTENIDAS**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de los procedimientos de ensayo definidos en el acápite 2.3 de este estudio. Se muestran las propiedades mecánicas tales como el esfuerzo máximo, deformación máxima, módulos de elasticidad y densidades de los materiales elaborados. Todos estos resultados fueron tabulados y procesados tanto en Excel como en el programa Statgraphics Plus 5.1, tomando como base de comparación de los datos al método de análisis de varianza (ANOVA) cuando las distribuciones muestrales pertenecen a una distribución normal. Cuando los resultados no correspondían a este tipo de distribución se utilizó el método de las diferencias menos significativas de Fisher (LSD). Este análisis estadístico se explica de mejor manera en el ANEXO 1 donde se presenta con detalle el análisis de los resultados obtenidos.

Como se definió anteriormente, fueron fabricadas 7 probetas por cada configuración y fracción volumétrica de fibra. Sin embargo, al momento de tabular los resultados solamente se utilizaron los valores de cinco de ellas, permitiendo separar aquellos valores que estaban más alejados, los cuales podían incidir en errores en los cálculos.

##### **3.1.4.1. Ensayo de tracción**

En la Tabla 3.11 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de tracción en los materiales elaborados. Estos valores corresponden al promedio de las cinco probetas ensayadas. Los valores individuales de cada probeta y sus respectivas



desviaciones estándar y coeficientes de variación se encuentran tabuladas en el ANEXO 1 en la TABLA A1.1. Además, en la Figura 3.16 se muestra la curva esfuerzo vs. deformación típica de la matriz y de los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá. En la Figura 3.17 se añade la curva característica de la fibra de abacá, graficada a partir de datos obtenidos en el proyecto de titulación de Andrés Salas, graduado de Ingeniería Mecánica de la EPN.

De acuerdo con lo observado en la Figura 3.16, tanto la matriz como los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá presentan curvas del tipo lineal lo que evidencia un comportamiento esencialmente frágil de los materiales. Por esta razón, los módulos de elasticidad de los materiales se calcularon obteniendo la pendiente de las curvas graficadas. Además, no existen diferencias significativas en los valores de deformación máxima en los diferentes tipos de configuraciones y orientaciones respecto a la matriz. Este fenómeno se debe a que la mayoría de las fallas producidas en las probetas se originaron en la matriz de PLA, ya que al momento que esta se fracturaba se perdía el medio para transferir la carga. Por lo tanto, estos tipos de falla evidenciaron una adhesividad deficiente entre la matriz y los refuerzos de fibra. Este fenómeno también se puede observar claramente en la Figura 3.17, donde se evidencia que la eficiencia máxima del refuerzo en la matriz no supera 62%.

Estos valores se presentan en la Tabla 3.9 y fueron calculados para cada una de las propiedades a tracción en materiales de fibra continua unidireccional utilizando el modelo presentado en la Ecuación 3. 1y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.9.

$$P_c = P_c * X_f * k + P_m * X_{f,m} \quad 3.1$$

Donde  $P_c$ : Propiedad a estudiar,  $X_{f,m}$ : fracción volumétrica de la fibra, matriz,  $k$ : eficiencia del refuerzo.

Tabla 3.9. Eficiencia del refuerzo en la matriz.

Tipo del material	Fracción volumétrica de fibra	Eficiencia del refuerzo
	(%)	(%)
Compuesto de fibra continua longitudinal	13	46,79
Compuesto de fibra continua longitudinal	20	61,50

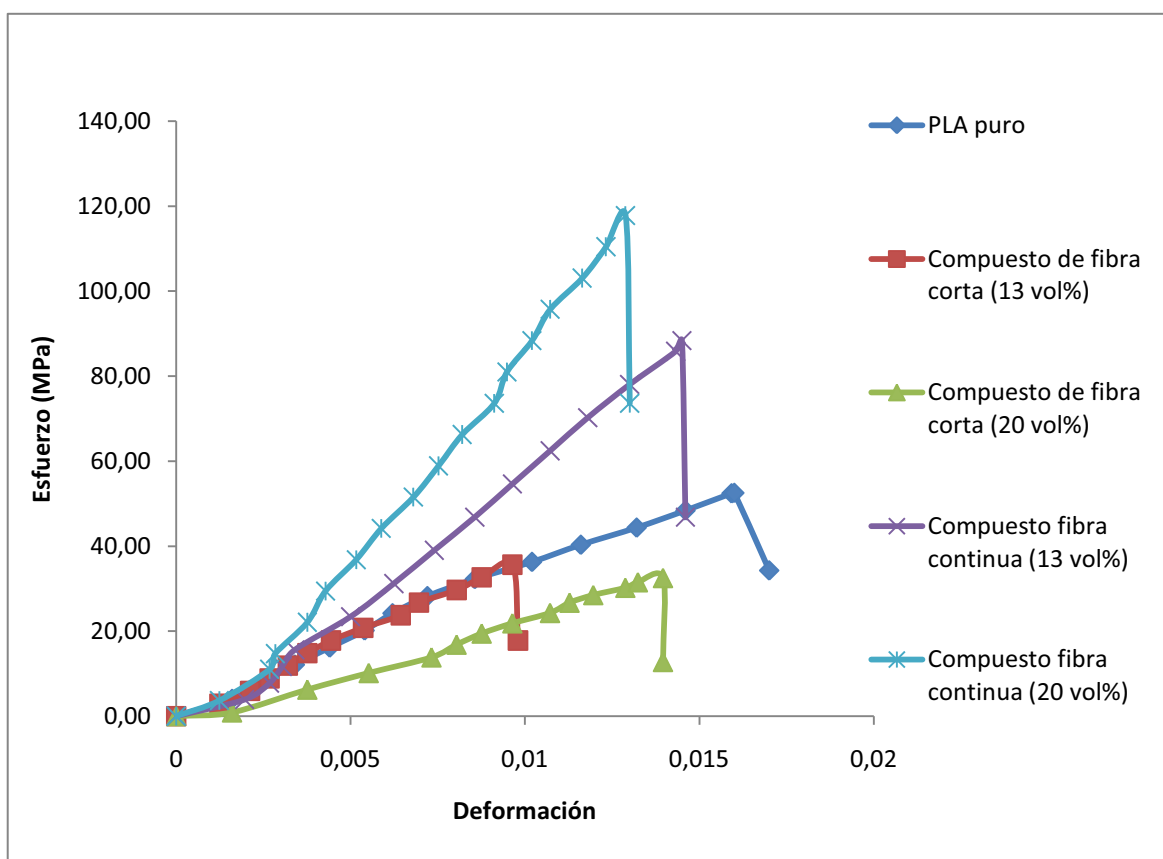


Figura 3.16. Curvas esfuerzo vs. deformación de los materiales compuestos elaborados y de la matriz de ácido poliláctico.\*

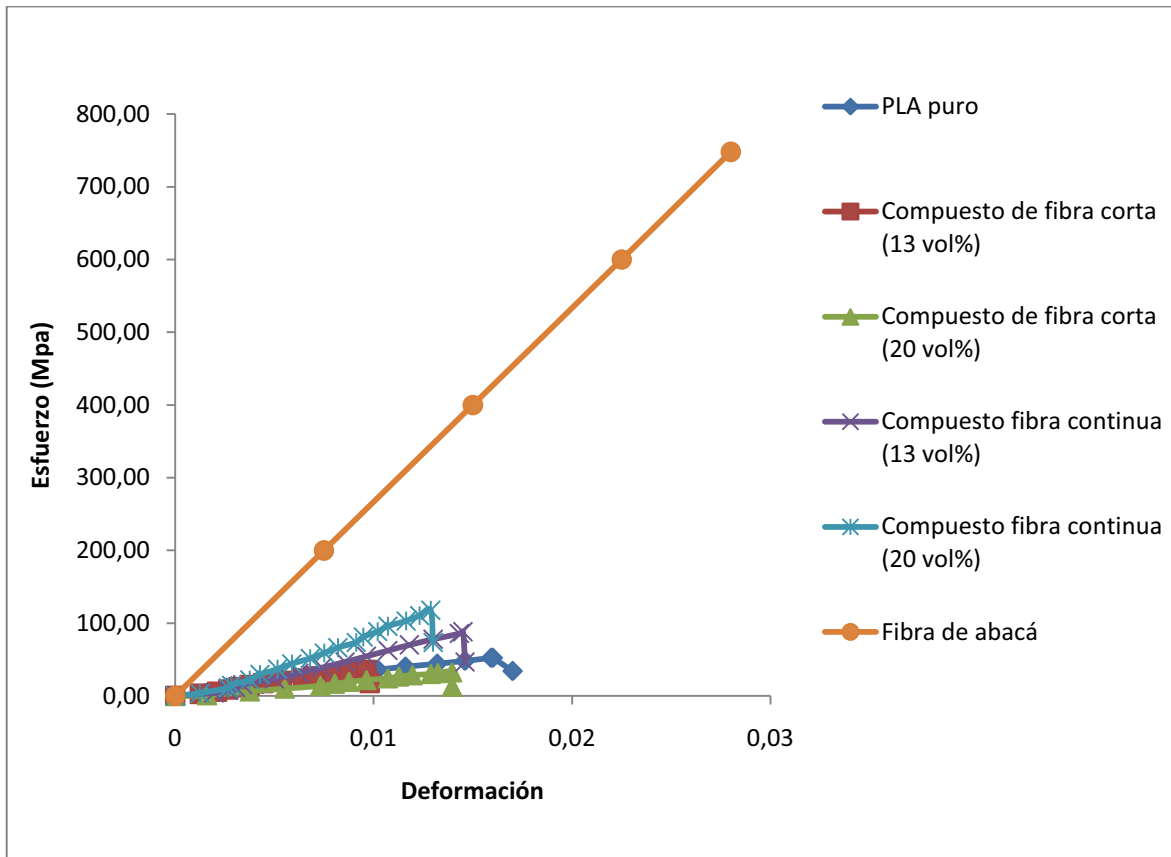


Figura 3.17. Curvas esfuerzo vs. deformación de los materiales elaborados y de la fibra de abacá.<sup>61</sup>

\*Las curvas corresponden a una sola probeta del grupo de 5 ensayadas por cada material elaborado.

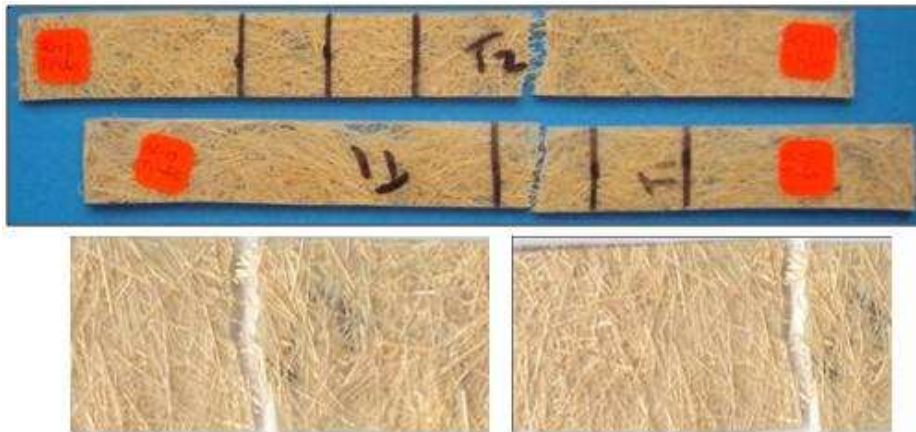
En la Figura 3.18 se muestran los diferentes tipos de probetas ensayadas y las fracturas que estas sufrieron durante el ensayo.



<sup>61</sup> SALAS, A; Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Febrero-2009.



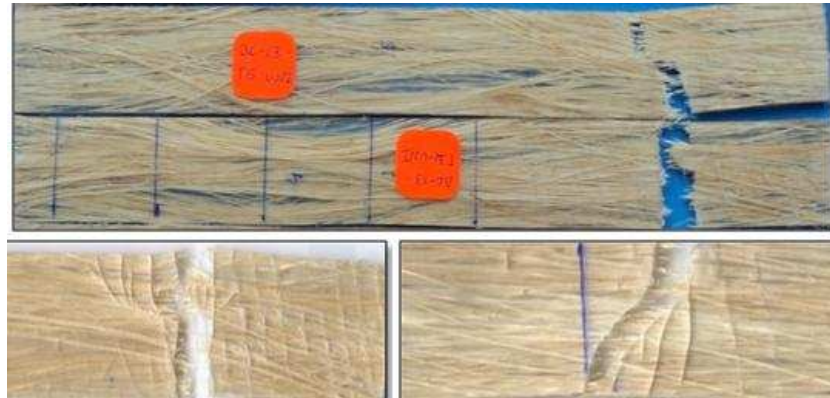
(a) Fractura frágil de la matriz sin producirse una reducción de la sección de la probeta.



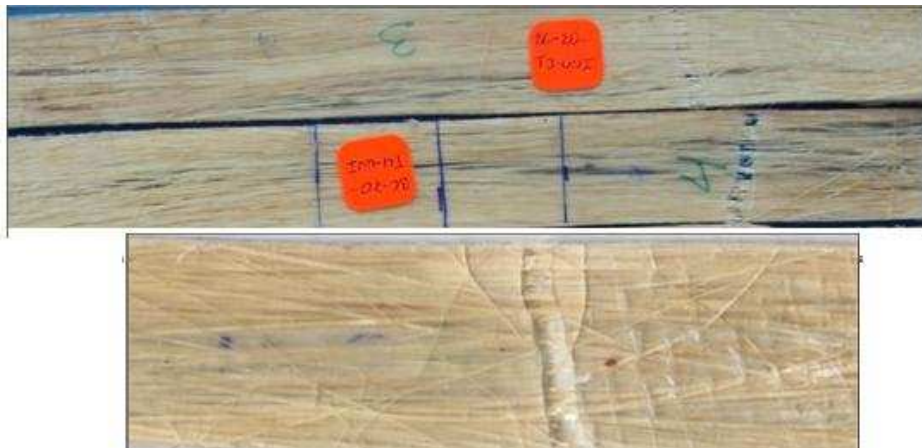
(b) Fractura de la matriz, no existe rotura de las fibras.



(c) Fractura producida enteramente en la matriz. Las fibras se encuentran entrelazadas unas con otras sin sufrir fractura.



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



(e) La matriz falla antes que las fibras lleguen a fracturarse.

Figura 3.18. Tipos de falla en probetas de compuestos reforzados con fibra de abacá (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%.

En el caso de las fracturas producidas en los materiales de elaborados de fibra continua unidireccional, el tipo de falla varió dependiendo de la concentración. Para los materiales de 0,13 vol% las fracturas corresponden a fallas tipo 4, expuestas en el libro de Mallick<sup>62</sup>, donde la falla de una fibra ocasiona la rotura de las fibras vecinas debido a la concentración de esfuerzos normales. Para los

<sup>62</sup> MALLICK, P.K.; Fiber-reinforced composites; Taylor & Francis Group, LLC; University of Michigan-Dearborn; 2007; p.153.

materiales de 0,20 vol% el tipo de falla corresponde al tipo 2, donde una microfisura en la matriz causa la rotura de la matriz sin llegar a romperse las fibras.

En la Figura 3.17 se observa más claramente la deficiente adhesión que las fibras tuvieron con los refuerzos de fibra de abacá. Es por esto que las curvas características obtenidas para los materiales reforzados se acercan más al de la matriz que a la de la fibra de abacá. Sin embargo, para los materiales elaborados con fibra continua unidireccional si existió un aumento considerable en las propiedades tanto para el esfuerzo máximo como para el módulo de elasticidad, tal y como se muestra en la Tabla 3.11.

En la Tabla 3.10 se presenta las propiedades a tracción de algunos de los polímeros comunes en la industria, con la finalidad de compararlos con los resultados obtenidos en los materiales elaborados en este estudio. Por lo tanto, como medio de comparación se graficó el diagrama resistencia vs. módulo elasticidad, el cual permitió identificar de manera más clara aquellos materiales con propiedades menores, similares o mayores respecto a otros, tal y como se observa en la Figura 3.19. La Figura 3.19 muestra tres zonas bien diferenciadas. La primera corresponde a los materiales elaborados con fibra continua unidireccional, tanto al 13 como al 20 %vol, que son aquellos que presentan las mejores propiedades a tracción. En el segundo grupo se encuentran el PET, PLA y el poliestireno con propiedades comparables. Finalmente, en el tercer grupo están ubicados el polipropileno y los compuestos de fibra corta dispersa con las propiedades más bajas.

Tabla 3.10. Propiedades a tracción de polímeros comunes en la industria.<sup>63</sup>

---

<sup>63</sup> MARK, J; Polymer Data Handbook; Oxford University Press, Inc ; 1.999.

<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Polietileno (PET)</b>	<b>Polietileno de alta densidad</b>	<b>Poliestireno (PS)</b>	<b>Polipropileno (PP)</b>
Resistencia a la tracción, MPa	50	10-60	30 - 60	26
Porcentaje elongación, %	180	...	1 - 4	10
Módulo de elasticidad, MPa	1700	60-290	3.200 - 3.400	1.389

Tabla 3.11. Variación de las propiedades mecánicas a tracción respecto a la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de PLA-abacá.

Tipo de material	Fracción volumétrica de fibra	Resistencia máxima promedio	Variación de la resistencia máxima respecto a la matriz	Módulo de elasticidad promedio	Variación del módulo de elasticidad respecto a la matriz	Deformación máxima promedio
	(%)	(MPa)		(MPa)		(m/m)
Matriz PLA	0	50	---	4.030	---	0,0161
Compuesto de fibra corta de 10 mm	13	38	Disminución en un 24 %	3.980	Disminución en un 2 %	0,0098
Compuesto de fibra corta de 10 mm	20	35	Disminución en un 30 %	3.366	Disminución en un 15 %	0,0117
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	13	89	Aumento en un 80 %	6.640	Aumento en un 65 %	0,0154
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	20	132	Aumento en un 165 %	9.223	Aumento en un 130 %	0,0133



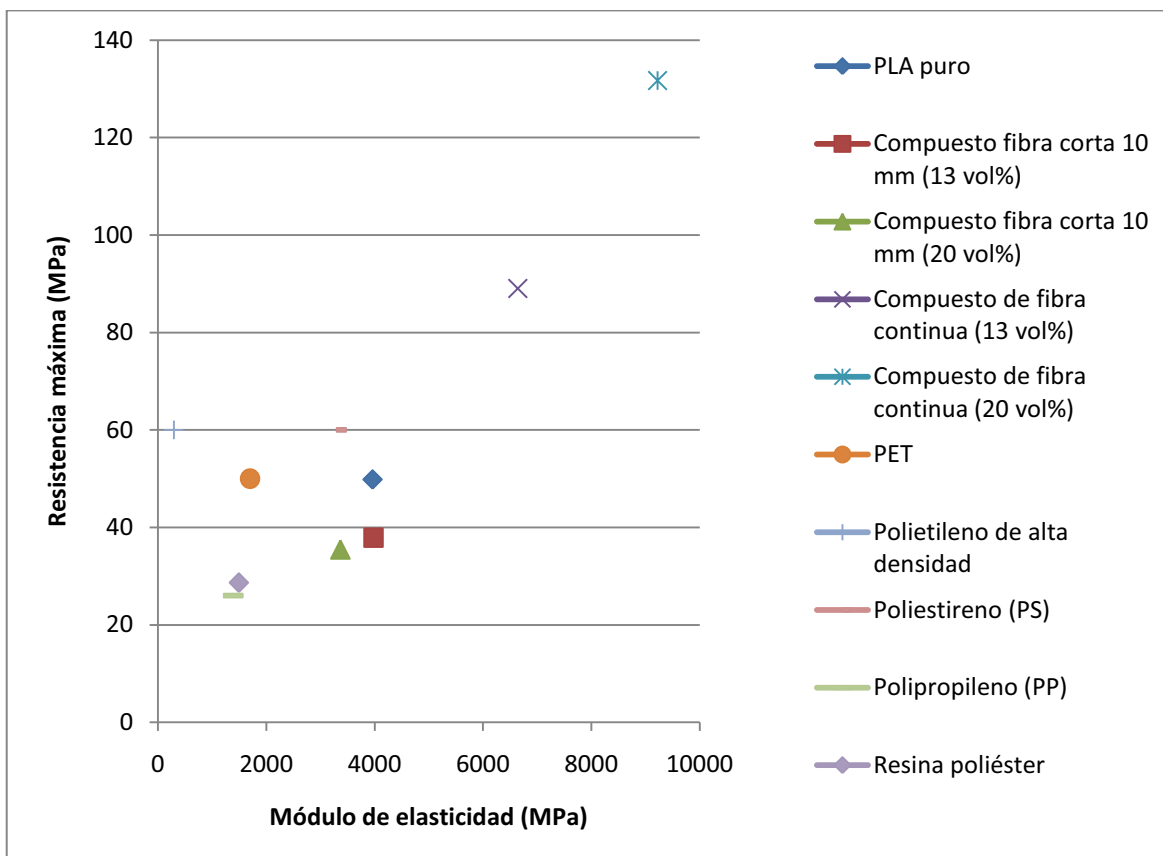


Figura 3.19. Diagrama resistencia máxima vs. módulo de elasticidad de los materiales compuestos elaborados, de la matriz de ácido poliláctico y de algunos polímeros comunes en la industria.

### 3.1.4.2. Ensayo de flexión

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados obtenidos después de la realización del ensayo de flexión en los materiales elaborados. Estos valores corresponden al promedio de las cinco probetas ensayadas. Los valores individuales de cada probeta y sus respectivas desviaciones estándar y coeficientes de variación se encuentran tabuladas en el ANEXO 1 en la Tabla A1.1. Asimismo, en la Figura 3.20 se muestran las curvas típicas esfuerzo vs. deformación tanto de la matriz y los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá.

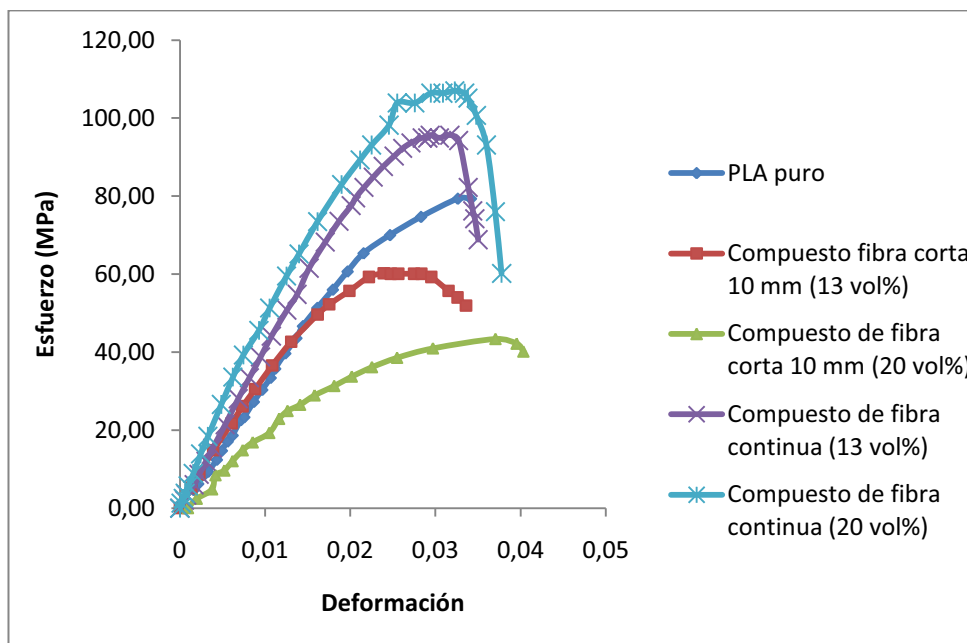


Figura 3.20. Curvas esfuerzo vs. deformación a la flexión de materiales compuestos de fibra de abacá y matriz de ácido poliláctico.\*

\*Las curvas corresponden a una sola probeta del grupo de 5 ensayadas por cada material elaborado.

De acuerdo con lo observado en la Figura 3.20, tanto la matriz como los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá presentan curvas del tipo lineal lo que confirma un comportamiento esencialmente frágil de estos materiales. Por esta razón, los módulos de elasticidad fueron calculados obteniendo la pendiente de las curvas obtenidas. Además, no existen diferencias significativas en los valores de deformación máxima en los diferentes tipos de configuraciones y orientaciones respecto a la matriz. Esto se debe a que, al igual que en el ensayo de tracción, las fallas se produjeron en la matriz de ácido poliláctico dejando las fibras sin daño alguno, ver Figura 3.21, lo que evidenció nuevamente una falta de adherencia entre la matriz y las fibras de refuerzo. En el caso de las matrices puras, las probetas se separaron completamente en dos partes; sin embargo para los materiales compuestos existió fractura de la matriz, pero debido a que las fibras se mantuvieron sin romperse no se dio la separación en partes de los especímenes. En la Figura 3.22 se presenta varias muestras de las probetas

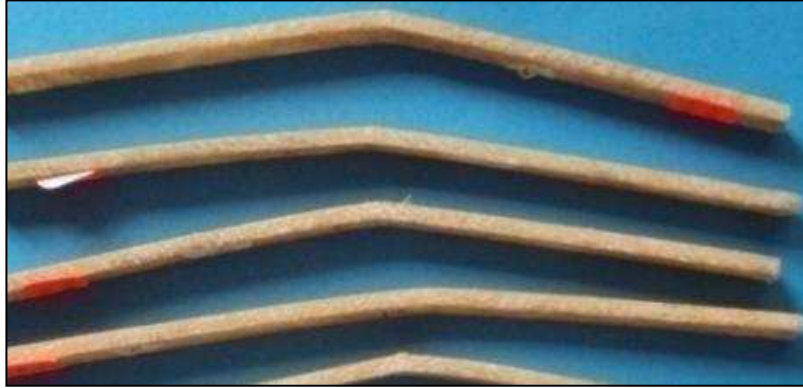


Figura 3.21. Fractura típica en la matriz de PLA en los materiales compuestos de fibra corta y continua unidireccional.



(a) Fractura completa de la matriz al final del ensayo.

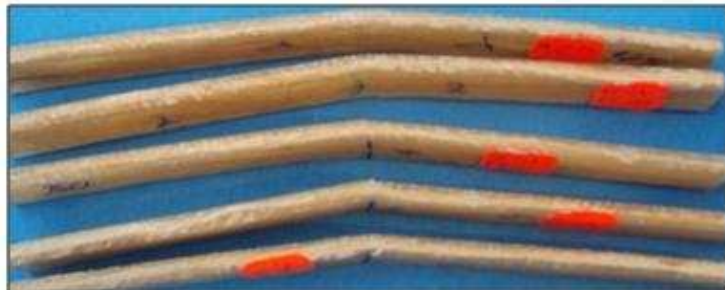
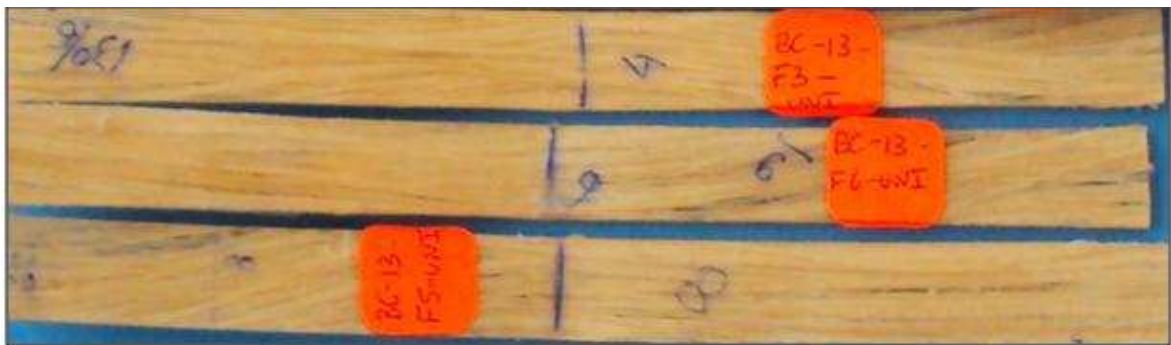




(b) Falla la matriz de PLA sin separación completa de las probetas.



(c) La matriz de PLA se fractura en la cara traccionada.



(d) Falla la matriz de PLA.



(e) Falla la matriz de PLA.

Figura 3.22. Tipos de falla en probetas de compuestos reforzados con fibra de abacá (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%.

Tabla 3.12. Variación de las propiedades mecánicas a flexión respecto a la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de PLA-abacá.

Tipo del material	Fracción volumétrica de fibra (%)	Resistencia máxima a la flexión promedio		Variación de la resistencia máxima respecto a la matriz	Módulo de elasticidad a la flexión promedio		Variación del módulo de elasticidad respecto a la matriz	Deformación unitaria máxima promedio	
		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(m/m)			
<b>Matriz PLA</b>	<b>0</b>	69,0		...	2.755	...	0,0341		
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	13	61,0		Disminución en un 11 %	3.592	Aumento en un 5 %	0,0295		
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	20	43,0		Disminución en un 35 %	2.359	No sufre variación significativa	0,0280		
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	13	97,5		Aumento del 40 al 50 %	4.292	Aumento del 55 %	0,0313		
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	20	104,4			5.570	Aumento del 100 %	0,0325		



Con la finalidad de mostrar los resultados de la Tabla 3.12 de una manera más clara, se graficó el diagrama resistencia máxima a la flexión vs. módulo de elasticidad a la flexión en la Figura 3.23. Esta figura muestra que al igual que en el ensayo de tracción los materiales elaborados con fibra continua unidireccional son aquellos que presentan las mejores propiedades a flexión.

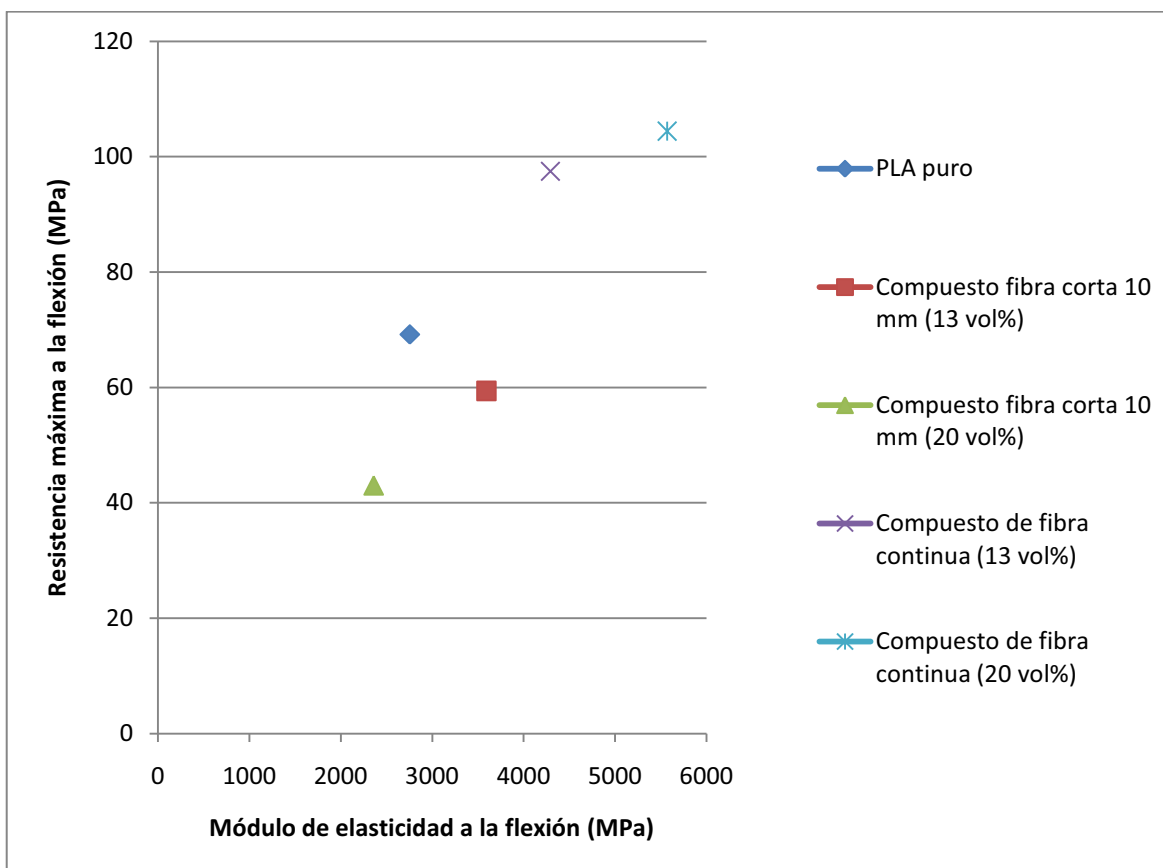


Figura 3.23. Diagrama resistencia máxima a la flexión vs. módulo de elasticidad a la flexión de los materiales compuestos elaborados y de la matriz de ácido poliláctico.

### 3.1.4.3. Ensayo de resistencia al impacto

Este ensayo fue el que presentó mayores dificultades durante el proceso de caracterización. Esto se debe a que las probetas tienen espesores grandes y al momento de fabricarlas la falta de adherencia entre la matriz y las fibras no permitía elaborar especímenes homogéneos. Por este motivo, la extracción de probetas debió ser cuidadosa, principalmente con especímenes de fibra continua orientada longitudinalmente. Para el caso concreto del ensayo de resistencia al

impacto se realizaron tanto especímenes muescados como no muescados para verificar la incidencia que el maquinado ejercía en los resultados. En las Tablas 3.13 y 3.14 se presentan los resultados obtenidos de estos dos tipos de ensayos.

Tabla 3.13. Variación de la resistencia al impacto respecto a la de la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de abacá-PLA en probetas sin muesca.

Tipo del material	Fracción volumétrica de fibra	Resistencia al impacto	Variación de la resistencia al impacto
	(%)	(J/m)	
<b>Matriz PLA</b>	0	196,94	...
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	13	196,48	No sufre variaciones significativas
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	20	500,22	Aumento del 150 %
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	13	637,1	Aumento del 200 %
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	20	711,57	Aumento del 200 %

De acuerdo con lo observado en las probetas ensayadas sin muesca, es notable el efecto de barrera de las fibras frente al impactador. Para el caso de la fibra corta tanto la matriz como las fibras se fracturaban (ver Figura 3.24) después de la acción del impactador. Este fenómeno no se repetía en las fibras continuas orientadas longitudinalmente donde la fractura se daba en la matriz pero las fibras no llegaban a romperse completamente. Estas fracturas se presentan en la Figura 3.26.



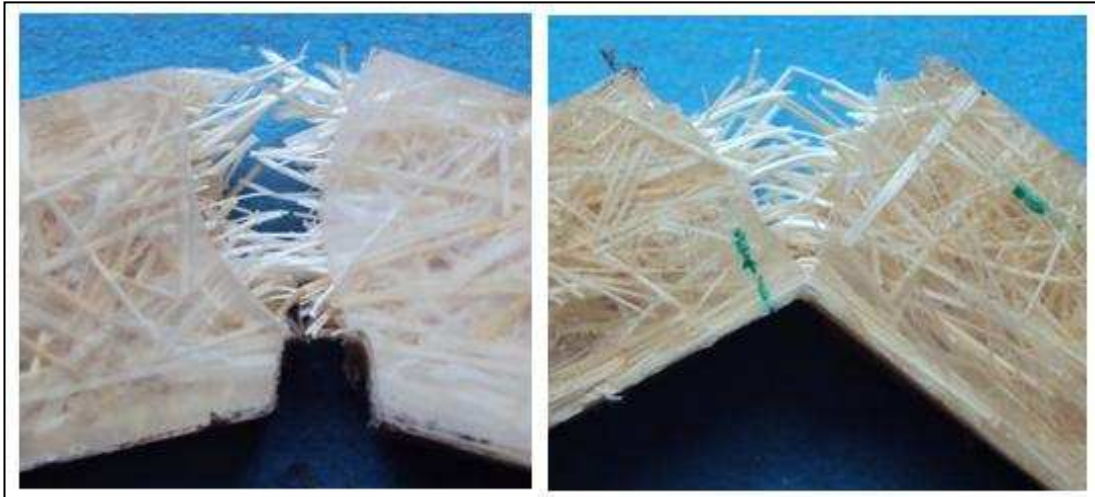


Figura 3.24. Fractura típica de las probetas de material compuesto de fibra corta.

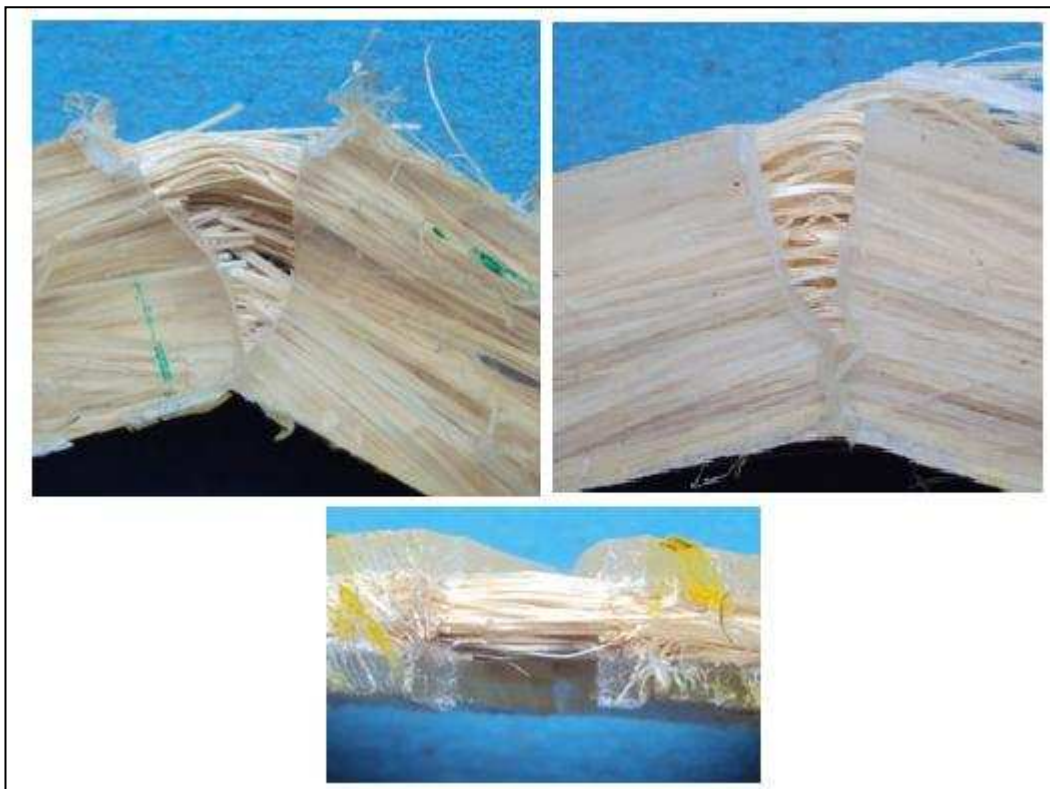


Figura 3.25. Fractura típica de las probetas de material compuesto de fibra continua unidireccional.

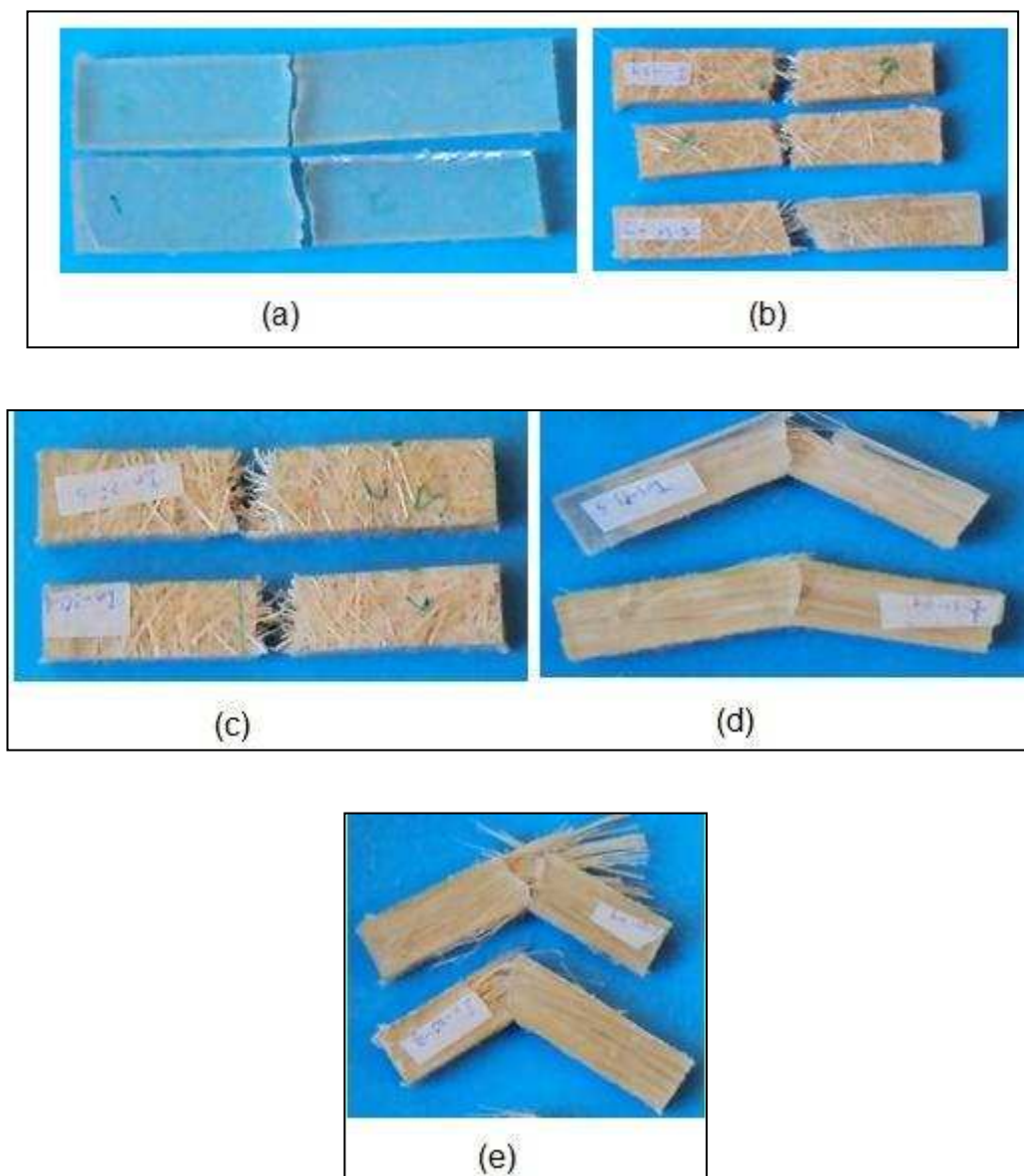


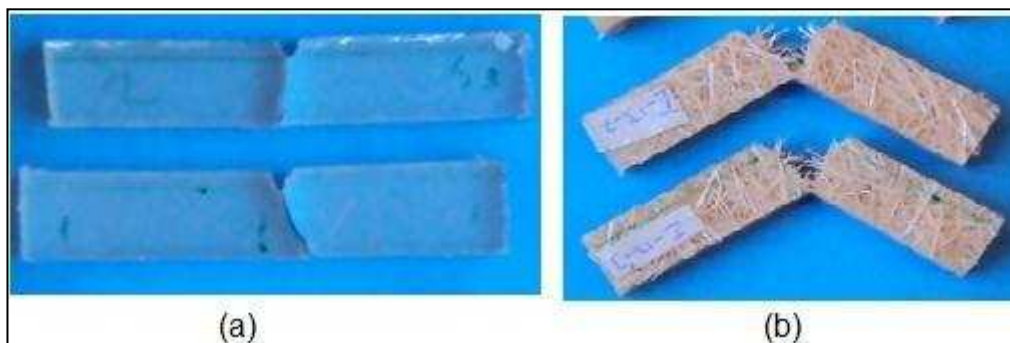
Figura 3.26. Tipos de falla en probetas de compuestos reforzados con fibra de abacá (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%.

Tabla 3.14. Variación de la resistencia al impacto respecto a la de la matriz de ácido poliláctico para materiales compuestos de abacá-PLA en probetas con muesca.

Tipo del material	Fracción volumétrica de fibra	Resistencia al impacto	Variación de la resistencia al impacto
	(%)	(J/m)	
Matriz PLA	0	40,4	...

<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	13	167,23	Aumento del 400 %
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	20	492,31	Aumento mayor al 1.000 %
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	13	625,50	
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	20	700,10	

Para el caso de las probetas muescadas la resistencia al impacto de la matriz se reducía considerablemente mientras que el efecto de la adición de fibras en los materiales compuestos no surtía ningún cambio en su comportamiento frente al impacto, por lo que los resultados tanto en probetas muescadas como no muescadas fueron valores muy similares. Por lo tanto, el efecto de la muesca se refleja más en los materiales puros y en menor medida en los materiales compuestos de fibra. Las fracturas sufridas en las probetas muescadas se muestran a continuación en la Figura 3.27.



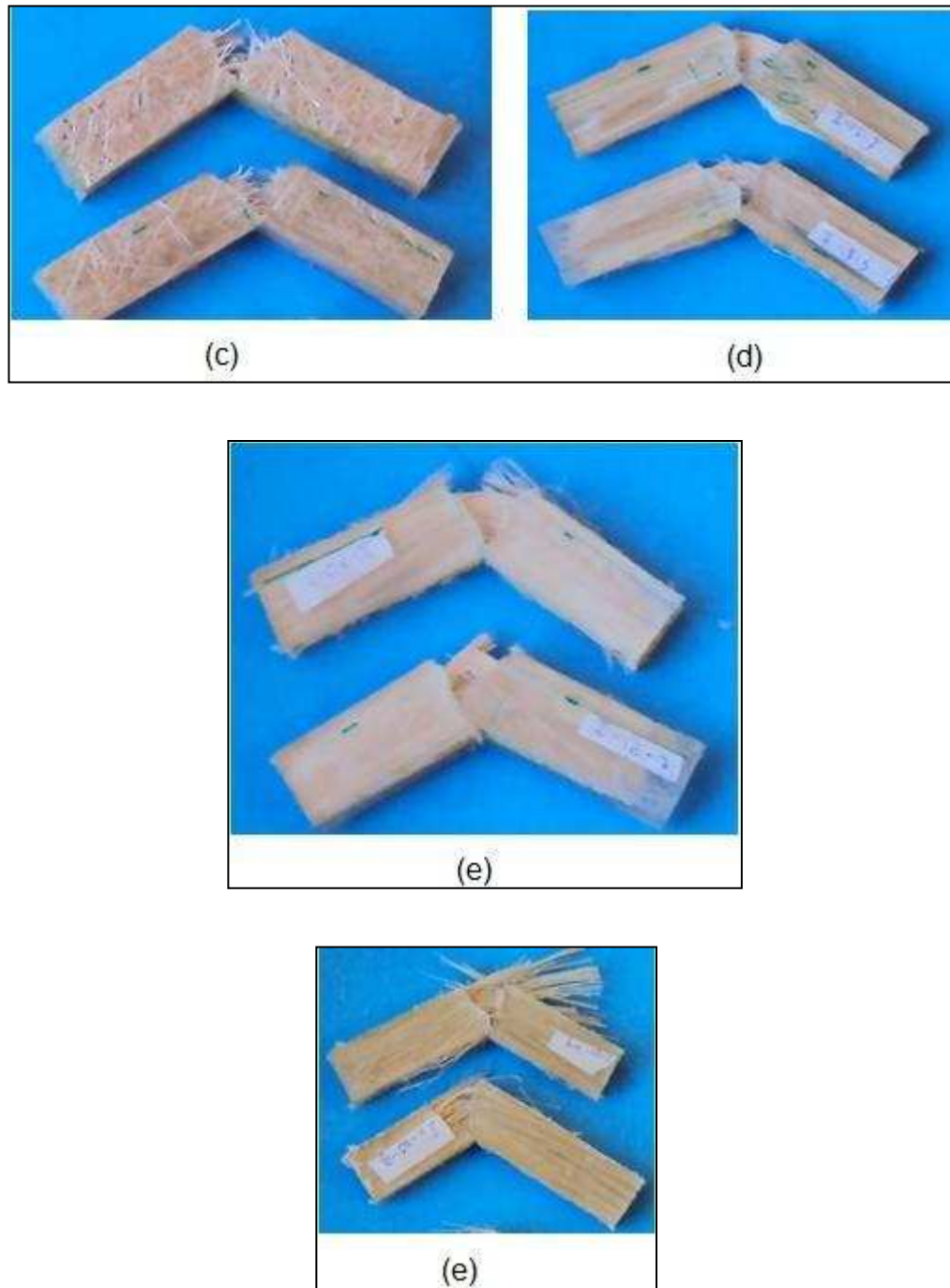


Figura 3.27. Tipos de falla en probetas de compuestos reforzados con fibra de abacá (a) Matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%, (c) fibra corta de 10 mm al 20 vol%, (d) fibra continua unidireccional al 13 vol%, (e) fibra continua unidireccional al 20 vol%.

#### 3.1.4.4. Densidad de los materiales elaborados

Las láminas utilizadas en la medición de densidad de los materiales fueron elaboradas con los resultados obtenidos después de la aplicación de la estrategia

metodológica. Se fabricaron láminas de 2,5 mm de espesor para cada una de las fracciones y configuraciones de fibra y se calculó la densidad teórica de los materiales mediante la Ecuación 3.2. Los resultados se tabulan en la Tabla 3.15.

$$\rho_{com} = Xvf * \rho_{fibra} + (1 - Xvf)\rho_{PLA} \quad 3.2$$

Donde  $\rho_{com}$ : densidad real del material compuesto, (g/cm<sup>3</sup>),  $Xvf$ : fracción volumétrica,  $V$ : volumen de la lámina, (cm<sup>3</sup>),  $\rho_{PLA}$ : densidad de la fibra, (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_{fibra}$ : densidad de la fibra, (g/cm<sup>3</sup>).

Tabla 3.15. Densidades teóricas y reales de los materiales elaborados.

Tipo de material	Fracción volumétrica de fibra	Densidad teórica	Densidad real	Desviación
	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
<b>PLA puro</b>	0	1,24*	1,2481	0,65
<b>Compuesto de fibra corta de 10 mm</b>	13	1,2478	1,2384	0,75
	20	1,2520	1,2561	0,32
<b>Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente</b>	13	1,2478	1,2405	0,59
	20	1,2520	1,1871	5,19

\*Para el caso de la matriz de PLA, la densidad teórica fue el valor entregado por el fabricante del producto.

En general la densidad de los materiales compuestos es mayor al de la matriz debido al refuerzo de abacá. Además, de acuerdo a la Tabla 3.15 solamente para el caso de los compuestos de fibra continua orientada longitudinalmente existió una diferencia considerable entre la densidad teórica y la densidad medida, esto se debió a que por la forma de procesar los materiales y por la distribución de la fibra entre las láminas de PLA, aire se quedaba atrapado dentro de los materiales disminuyendo la densidad de estos.

### 3.1.5. COMPUESTOS DE PLA FRENTE A OTROS MATERIALES COMPUESTOS

En este apartado se comparan las propiedades y el desempeño de los materiales formulados con otros materiales compuestos y otros materiales biodegradables existentes en el mercado. Algunos de los valores presentados pertenecen a estudios realizados como proyectos de titulación y tesis de grado de la EPN u otros valores referenciales obtenidos en bibliografía en el caso de materiales biodegradables. En la Tabla 3.16 se presenta un resumen de las propiedades alcanzadas en los materiales compuestos de matriz de PLA reforzadas con fibra de abacá de este estudio. Asimismo, en la Tablas 3.17, 3.18 y 3.19 se muestran valores referentes a las mejores combinaciones obtenidas al añadir fibra en diferentes matrices poliméricas elaboradas en otros estudios. Además, con fines didácticos se muestran gráficos multieje para comprar los diferentes materiales expuestos en las tablas.

Tabla 3.16. Propiedades mecánicas de compuestos de PLA y fibras naturales de abacá.

Tipo de material	Fracción volumétrica de fibra (%)	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)	Resistencia al impacto (J/m)	Porcentaje de elongación en 50 mm
PLA	0	50	4.030	69	2.755	196,94	1,62
Compuesto de fibra corta de 10 mm	20	35	3.366	43	2.359	500,22	1,18
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	20	132	9.223	104,4	5.570	711,57	1,35

Tabla 3.17. Propiedades mecánicas de la resina poliéster y compuesto reforzados con fibra de cabuya.<sup>64</sup>

Tipo de material	Fibra 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)	Energía absorbida al impacto (J)*
Resina poliéster	---	28,67	1.492,42	56,62	1.867,82	0,70
A.SE.16h.34%**	cabuya	60,63	6.508,18	76,29	4.434,10	0,15

\*Estos valores de energía absorbida al impacto no son comparables con los obtenidos en este estudio, debido a que estos valores son el resultado de un ensayo de impacto por caída de dardo, que normalmente se hace en materiales que van a ser utilizados en tableros o paneles.

\*\* Compuesto sin estireno secado 16 horas con fracción volumétrica de fibra de cabuya 0,34 vol%:

De acuerdo a los valores de la Tabla 3.16 y lo observado en la Figura 3.28, la mejor formulación de compuestos de PLA/abacá, fibra continua al 20 vol%, supera en más de un 50% a las propiedades de los materiales de poliéster/cabuya obtenidos en otro estudio. A su vez, los valores a tracción de los compuestos poliéster /cabuya son comparables al compuesto de fibra corta de 10 mm de PLA/ abacá, lo que es importante ya que estos materiales son más fáciles de fabricar que los de fibra continua.

Tabla 3.18. Propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá.<sup>65</sup>

<sup>64</sup> TAMAYO, A; Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras de cabuya; Laboratorio de Nuevos Materiales; Escuela Politécnica Nacional; Quito, Noviembre; 2011.

<sup>65</sup> MOSCOSO, 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.



Tipo de material	Fibra 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)
Polipropileno	---	31,62	548,65	37,5	1.249,60
Compuesto de fibra corta de 30 mm, 35 vol%	abacá	37,3	1.277,80	52,33	1.952
Compuesto de fibra corta de 20 mm, 35 vol%	abacá	38,45	1.110,00	51,7	1.989,00
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 35 vol%	abacá	87,44	2.400	124,36	5.175

De acuerdo a los valores de la Tabla 3.16 y lo observado en la Figura 3.28, la mejor formulación de compuestos de PLA/abacá, fibra continua al 20 vol%, tiene propiedades similares tanto a tracción como flexión con la mejor formulación de materiales de polipropileno/abacá (fibra continua al 30 vol%). Cabe recalcar que se debe tomar en cuenta que sus porcentajes de elongación son diferentes (polipropileno y sus compuestos elongación entre 8 y 25%), lo que presenta una limitante para el uso de PLA en lugar del polipropileno en algunas aplicaciones.

Tabla 3.19. Propiedades mecánicas de compuestos de poliéster reforzado con fibras de abacá.<sup>66</sup>

Tipo de material	Fibra de refuerzo	Resistencia máxima a la tracción (MPa)	Resistencia máxima a la flexión (MPa)

<sup>66</sup> GUERRERO, V; et al.; Nuevos Materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Escuela Politécnica Nacional; Imprefepp; Quito-Ecuador, 2011.



Poliéster	---	37,17	60,41
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 30 vol%	abacá	29,24	47,52
Compuesto de fibra corta de 10 mm, 25vol%	abacá	25,76	51,80
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 35 vol%	abacá	136,95	109,89
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente, 25 vol%	abacá	120,34	107,00

De acuerdo a los valores de la Tabla 3.16, la mejor formulación de compuestos de PLA/abacá, fibra continua al 20 vol%, tiene propiedades similares tanto a tracción como flexión con la mejor formulación de materiales de poliéster/abacá (fibra continua al 25 vol%). Sin embargo, esto demuestra que las fibras de abacá tienen una mayor eficiencia en las matrices de poliéster que en el PLA. Además, en estas matrices de poliéster se muestra que al igual que el PLA reforzado con fibras dispersas, las propiedades disminuyen tanto a tracción como flexión.

Finalmente, si comparamos los resultados presentados en la Tabla 1.20 y lo observado en la Figura 3.29, con los valores de la mejor formulación de compuestos de PLA/abacá, fibra continua al 20 vol%, estos compuestos presentan valores similares a otros biocompuestos elaborados de PLA reforzados con lino (30 vol%) y yute (40 vol%). Además, se comprueba que la adición de fibras dispersas de abacá no mejora las propiedades a flexión de la matriz de PLA. Estos comportamientos se muestran en la recopilación bibliográfica en Figura 1.26.

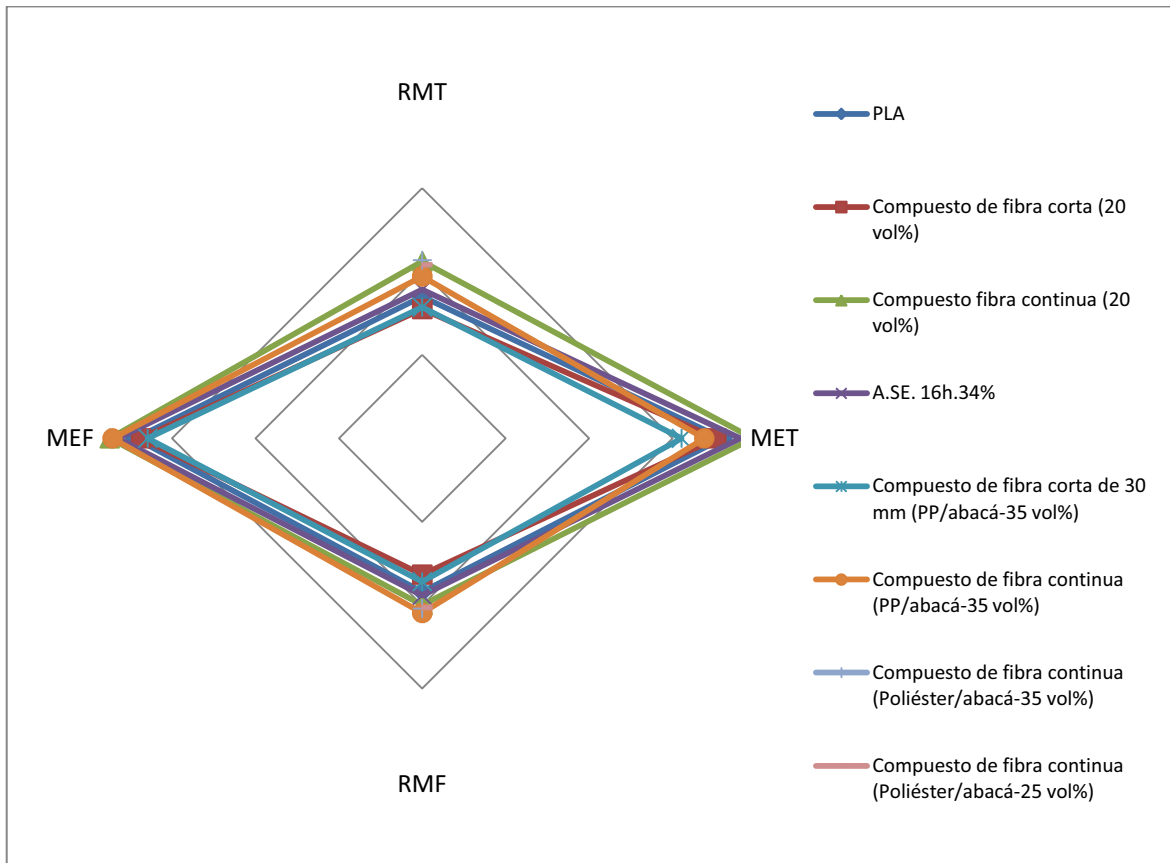


Figura 3.28. Gráfico multieje de los materiales elaborados en el estudio frente a compuestos de poliéster, polipropileno/abacá.

Donde RMT: resistencia máxima a la flexión (MPa), MET: módulo de elasticidad a tracción (MPa), RMF: resistencia máxima a la flexión (MPa) y MEF: módulo de elasticidad a la flexión.

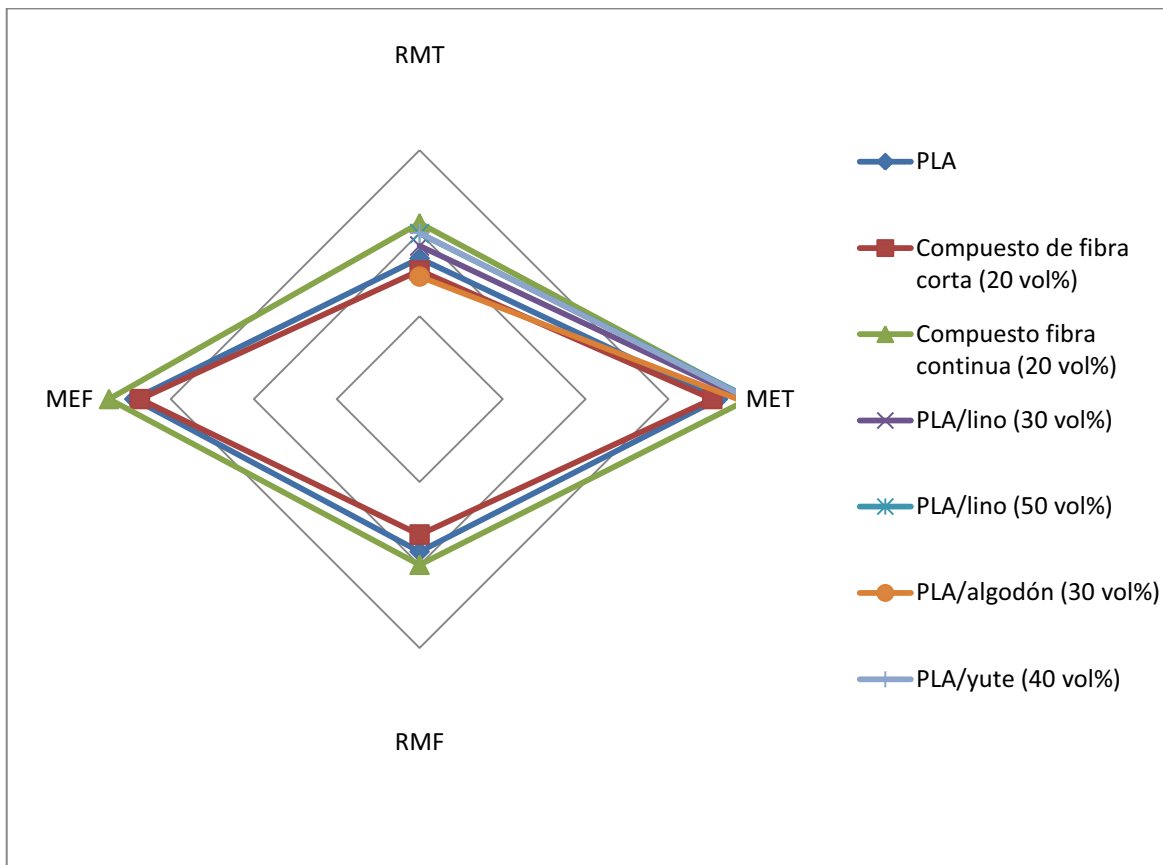


Figura 3.29. Gráfico multieje de los materiales elaborados en el estudio frente a compuestos de PLA/fibras naturales.

### 3.1.6. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

En la Tabla 3.20 se muestran los resultados del análisis funcional llevado a cabo sobre los materiales elaborados explicados en el acápite 2.4.1.

De acuerdo con la valoración de las características del material presentada en dicha tabla, se pudo analizar que clases de prototipos pueden ser desarrollados en el presente estudio, basándose en las aplicaciones listadas en el acápite 1.2.5 y en productos existentes en el mercado.

**(i) Productos para la industria médica:** este tipo de productos no podían ser elaborados como prototipos en el presente estudio debido a varias razones:

- No se conocen los tiempos exactos de biodegradación de los materiales reforzados con fibras para las configuraciones utilizadas en el estudio. Además, para estas aplicaciones se requieren estudios más completos del material debido a su delicado uso.
- El método de procesamiento impide obtener fibras para elaborar mallas, placas o hilos para suturas. Además de la incapacidad de fabricar tornillos, pines, clavos a base del material compuesto.
- El uso de este tipo de materiales no es conocido en el país dificultando la posibilidad de vender el producto.

Tabla 3.20. Valoración de las características del material de acuerdo al análisis funcional.

<b>Características</b>	<b>Valoración</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
	<b>Biodegradabilidad del material</b>					X
	<b>Apariencia del material</b>			X		
	<b>Resistencia del material</b>					X
	<b>Costo del material</b>		X			
	<b>Método de procesamiento del material</b>		X			
	<b>Durabilidad del material</b>		X			
	<b>Trabajo en altas temperaturas</b>		x			
	<b>Inflamabilidad del material</b>				X	
	<b>Versatilidad de color</b>	X				
	<b>Versatilidad de geometría</b>	X				
	<b>Toxicidad</b>					X
	<b>Capacidad de esterilización</b>	X				
	<b>Comportamiento frente a la humedad</b>				X	
	<b>Protección antibacterial</b>				X	

	<b>Resistencia a agentes de limpieza</b>						x
--	--	--	--	--	--	--	---

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

**(ii) Productos para la industria del empaquetamiento:** Este tipo de productos no pueden ser fabricados en su presentación como filmes para cubrir los productos de la acción ambiental debido a que la mayoría de estas aplicaciones tienen paredes delgadas que no se pueden obtener con el método de procesamiento usado. Sin embargo, los recipientes de productos constituyen una buena posibilidad para la elaboración del prototipo.

**(iii) Productos para la industria textil:** este tipo de productos no pueden ser fabricados como prototipos, ya que el método de procesamiento no permite obtener fibras a base de este polímero.

**(iv) Otras aplicaciones:** como las aplicaciones comunes del PLA no se aplican para la realización del prototipo en este estudio, se analizaron posibilidades de productos presentes en el mercado como:

**- Recipientes para conservación y presentación de alimentos:** son una buena posibilidad de aplicación para la elaboración del prototipo debido a que los productos existentes en el mercado presentan geometrías y métodos de procesamiento que se pueden replicar. Además estos productos no se encuentran expuestos a severos cambios de temperatura ni condiciones de temperatura extrema y las dimensiones están dentro de las posibilidades de fabricación. Sin embargo, los productos a base de PLA y refuerzos tendrán un costo superior y mayor dificultad de ingreso en el mercado.

**- Casings para equipos electrónicos:** es una buena posibilidad de aplicación porque se puede aprovechar las mejoras en las propiedades mecánicas en el material, a su vez el periodo de vida de este tipo de productos coincide con el que el PLA puede permanecer con sus propiedades intactas. Sin embargo, estos productos exigen formas complejas y detalles en el diseño y en ciertos casos

podían estar expuestos a altas temperaturas generadas por los elementos electrónicos

- **Partes de módulos, paneles en la industria automotriz:** el principal problema consiste en la apariencia del material, la cual no es muy atractiva para un adquirente de un automóvil. Además, el proceso de fabricación es demasiado artesanal y costoso para que un producto de producción en masa lo use.

- **Cajas para recuerdos o publicidad:** este tipo de aplicaciones son una gran posibilidad ya que la condición de material biodegradable y su apariencia le permiten provechar campañas ecológicas creadas por empresas y al mismo tiempo el alto costo del material puede ser absorbido por esta condición. Además, las propiedades mecánicas de los refuerzos se pueden utilizar para elementos de mayor peso sin aumentar el tamaño de las cajas.

### Método ordinal de criterios ponderados

De acuerdo con los criterios descritos en el acápite 2.4.2 se desarrolló el método ordinal, el mismo que arrojó los siguientes resultados. En la Tabla 3.21 se muestran la valoración de los criterios de selección.

Tabla 3.21. Resultado de la valoración de los criterios de selección.

Criterio	Costo	Conformado	Resistencia	Vida útil	Ambiente	Aplicación Ecológica	$\Sigma+1$	pond.
Costo		0	1	1	1	0	4	0,19
Conformado	1		1	1	1	0,5	5,5	0,26
Resistencia	0	0		1	1	0	3	0,14
Vida útil	0	0	0		0	0	1	0,05
Ambiente	0	0	0	1		0	2	0,10
Aplicación ecológica	1	0,5	1	1	1		5,5	0,26
						Suma	21	1

Donde:

1: si el criterio de las filas era superior que el de las columnas

0,5: si el criterio de las filas era equivalente al de las columnas

0: si el criterio de las filas era inferior que el de las columnas

Seguidamente en las Tablas 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27 se valoraron los pesos específicos de cada criterio de acuerdo a cada una de las alternativas presentadas. Las alternativas propuestas fueron:

- A1: plato para servir postres.
- A2: cajas para recuerdos o empaques de productos.
- A3: Bandeja para servir frutas, paneras, ensaladas, salsas.
- A4: Cacerola para almacenar comida.

Tabla 3.22. Peso específico del criterio aplicación ecológica.

Aplicación ecológica	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0,00	0,50	1,00	2,50	0,25
A2	1,00		1,00	0,00	3,00	0,30
A3	0,50	0,00		1,00	2,50	0,25
A4	0,00	1,00	0,00		2,00	0,20
				Suma	10,00	1,00

Tabla 3.23. Peso específico del criterio proceso de conformado.

Proceso de conformado	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		1,00	0,50	1,00	3,50	0,35
A2	0,00		0,00	1,00	2,00	0,20
A3	0,50	1,00		1,00	3,50	0,35
A4	0,00	0,00	0,00		1,00	0,10
				Suma	10,00	1,00

Tabla 3.24. Peso específico del criterio costo.

Costo	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0,50	0,50	1,00	3,00	0,30
A2	0,50		0,50	1,00	3,00	0,30
A3	0,50	0,50		1,00	3,00	0,30
A4	0,00	0,00	0,00		1,00	0,10
				Suma	10,00	1,00

Tabla 3.25. Peso específico del criterio resistencia.

Resistencia	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0,00	0,00	0,50	1,50	0,15
A2	1,00		1,00	1,00	4,00	0,40
A3	1,00	0,00		1,00	3,00	0,30
A4	0,50	0,00	0,00		1,50	0,15
				Suma	10,00	1,00

Tabla 3.26. Peso específico del criterio ambiente de trabajo.

Ambiente de trabajo	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0,00	0,00	1,00	2,00	0,20
A2	1,00		0,50	1,00	3,50	0,35
A3	1,00	0,50		1,00	3,50	0,35
A4	0,00	0,00	0,00		1,00	0,10
				Suma	10,00	1,00

Tabla 3.27. Peso específico del criterio vida útil.

Vida útil	A1	A2	A3	A4	$\Sigma+1$	Ponderación
A1		0,00	0,50	1,00	2,50	0,25
A2	1,00		1,00	1,00	4,00	0,40
A3	0,50	0,00		1,00	2,50	0,25
A4	0,00	0,00	0,00		1,00	0,10
				Suma	10,00	1,00

De acuerdo con la Tabla 3.28 la alternativa A1 obtuvo la más alta ponderación. Por lo tanto, las cajas para recuerdos y recipientes de productos es la alternativa que se escogió para la realización del prototipo a base de PLA y materiales compuestos reforzados con fibra de abacá.

Tabla 3.28. Resultados del método de comparación de alternativas.

Conclusión	Costo	Conformación	Resistencia	Vida útil	Ambiente	Aplicación Ecológica	$\Sigma$	Prioridad
A1	0,06	0,09	0,02	0,01	0,02	0,07	0,27	3
A2	0,06	0,05	0,06	0,02	0,03	0,08	0,30	1
A3	0,06	0,09	0,04	0,01	0,03	0,07	0,29	2
A4	0,02	0,03	0,02	0,00	0,01	0,05	0,13	4



### 3.1.6.1. Obtención del prototipo

#### (i) Pruebas preliminares

Con las pruebas de moldeo se llegó a la conclusión que tanto para las láminas de PLA como para los materiales compuestos la temperatura adecuada para realizar cualquier cambio en la configuración de la lámina es de 60 °C. Si se excede esta temperatura la matriz de PLA empieza a desprenderse en forma de hilos. Cabe recordar también que una vez alcanzada esta temperatura el formado del material debe ser inmediato para evitar que la lámina se vuelva a rigidizar. En la Figura 3.30 se muestran láminas de PLA con formas logradas sin la ayuda de moldes. Esto evidenció que la matriz de PLA si podía tomar las formas que se necesitaban para elaborar el prototipo.



Figura 3.30. Láminas de PLA termoformadas sin molde.

#### (ii) Diseño del prototipo

En la Figura 3.31 (a), se presenta el diseño normal que una caja típica de recuerdos o un recipiente de productos exhibe en el mercado. Partiendo de este diseño se continuó realizando cambios a esta apariencia inicial. En la Figura 3.31 (b) se muestra la configuración que finalmente tendría el producto realizado.

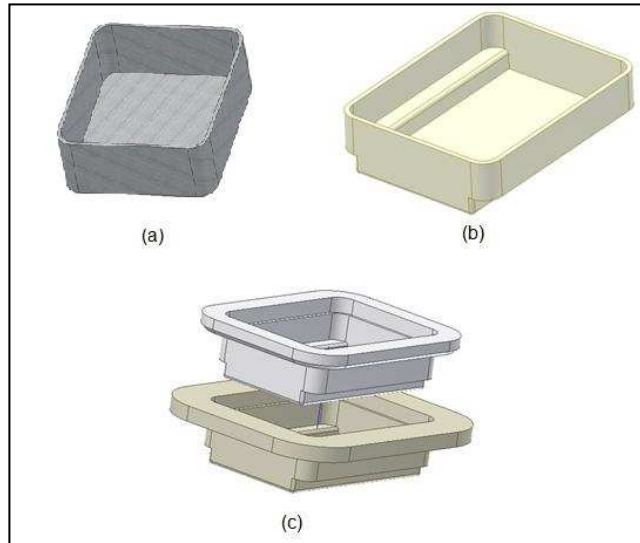


Figura 3.31. (a) diseño normal, (b) diseño final del prototipo, (c) molde macho-hembra.

Con esta configuración se diseñó un molde macho-hembra, el mismo que se fabricó en madera (ver Figura 3.31 (c)) para realizar pruebas en los diferentes tipos de materiales estudiados. En la Figura 3.32 se presenta el molde macho-hembra de madera y una de las cajas termoformadas con este molde. Esta caja presentaba un acabado superficial pobre y arrugas en las paredes debido a la contracción del material al momento de termoformarse.



Figura 3.32. Molde macho-hembra de madera y caja de material compuesto termformada en el mismo.

Gracias a los ensayos realizados en el molde preliminar de madera, se pudieron analizar problemas que se generaban al momento de moldear los materiales compuestos, los mismos que permitieron hacer correcciones y mejoras en el diseño del molde antes de construir el definitivo. Las principales observaciones que se tuvieron fueron las siguientes:

- El acabado superficial del prototipo con el molde de madera no era el deseado. Necesariamente se necesitaba una superficie más lisa para obtener mejores resultados.
- El molde debía contar con guías que permitan la correcta unión entre el macho y la hembra del molde.
- La reducción de la sección debía darse en todos los lados del prototipo para evitar cambios bruscos en la geometría del molde.

- Se debía mejorar el sistema de calentamiento de la lámina antes de su moldeado.
- El molde debía constar con un sistema de prensa chapas para evitar el encogimiento del material en el momento del termoformado.

Con todas estas mejoras se diseñó y construyó un molde en acero para realizar el termoformado correcto de las láminas de matriz de PLA y de los materiales compuestos. El diseño y el molde final se presentan en la Figura 3.33, los planos del mismo se adjuntan en el ANEXO 2 de este trabajo.

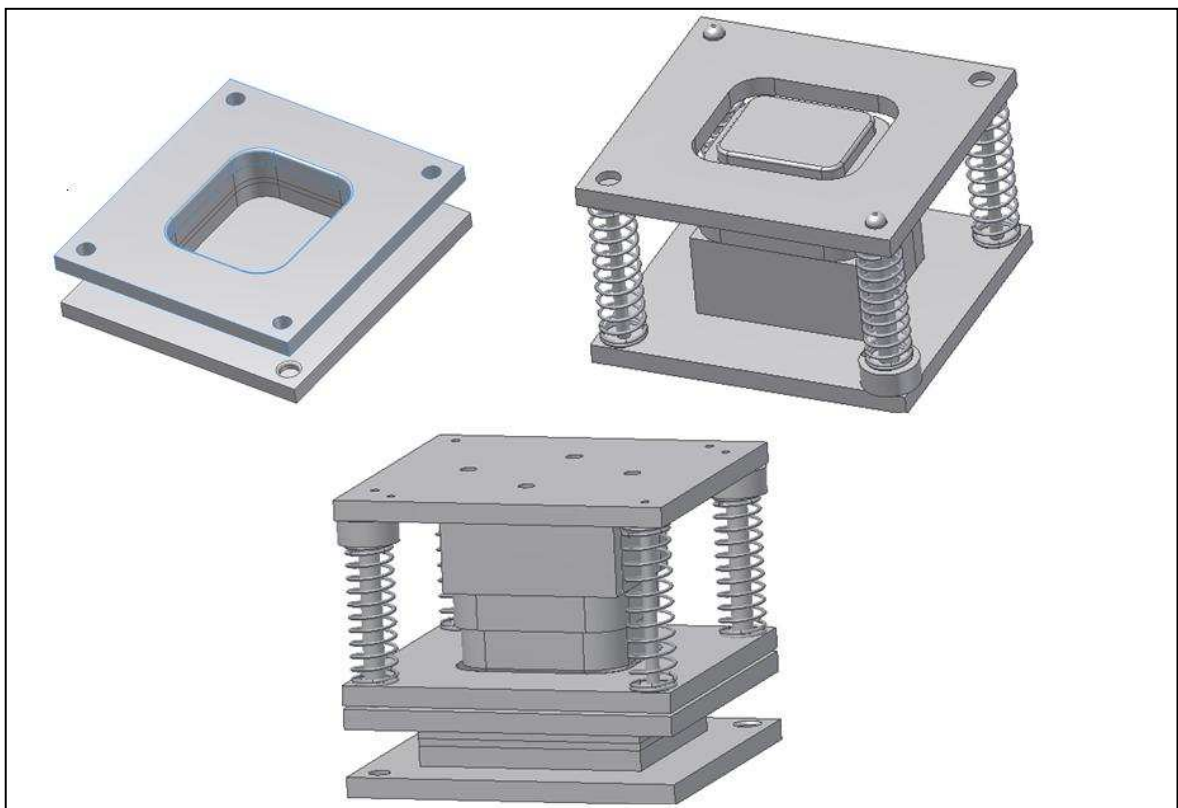


Figura 3.33. Molde macho-hembra final construido en acero ASTM A-36.

### 3.1.6.2. Proceso de fabricación del prototipo

En la Tabla 3.29 se muestran las temperaturas definidas para el termoformado y los tiempos aproximados de calentamiento utilizando la estufa Cimarec programada en 270°C de acuerdo al espesor de lámina a termoformar. Todos estos valores fueron obtenidos después de llevar a cabo un gran número de pruebas, ya que como en el caso del procesamiento de los materiales por

compresión, el aumento o disminución de la temperatura en la estufa producía fallas en los productos. Cuando la temperatura era demasiado baja y la lámina no llegaba a su estado de deformación se obtenía la rotura de la lámina por la fuerza ejercida por el macho del molde. A su vez, cuando la temperatura era excesiva la lámina superaba la temperatura adecuada para su deformación produciéndose el desprendimiento del PLA de la lámina en forma de hilos de material.

Tabla 3.29. Tabla de temperaturas y tiempos de calentamiento de las láminas a ser termoformadas.

Material	Espesor de lámina (mm)	Temperatura de termoformado (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
	PLA		
	1,5		
	2		
Material Compuesto	1,5	80 -90	170
	2		
	2,5		210

Además, debido a la característica frágil tanto del PLA como de los materiales compuestos, se evidenciaron problemas al momento de moldear al prototipo, ya que este en su diseño tiene un cambio de sección y fue ahí donde justamente se tuvieron los mayores problemas al momento de fabricar las bandejas, ya que si el material no se encontraba en las temperaturas adecuadas tendía a resquebrajarse en esas zonas. Estas fallas se muestran en la Figura 3.34.

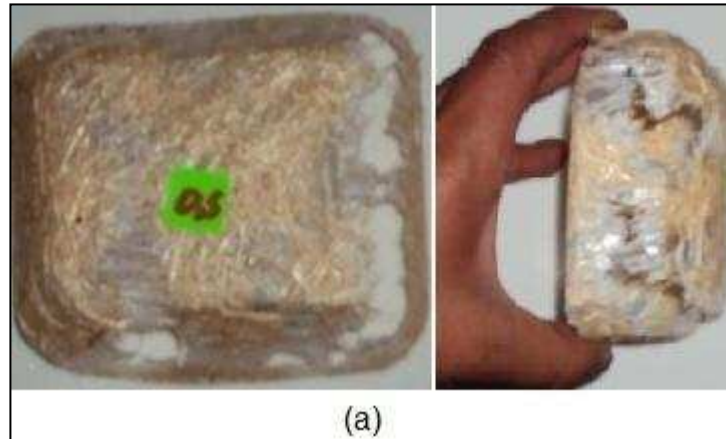


Figura 3.34. Bandejas resquebrajadas en los cambios bruscos de geometría.

Igualmente, se encontraron problemas en la base del prototipo donde en algunas pruebas se obtuvieron roturas en esta zona y fibra desbordada. En este caso el problema era también poder mantener las temperaturas de termoformado adecuadas en la lámina durante el proceso. Estas fallas se presentan en la Figura 3.35.

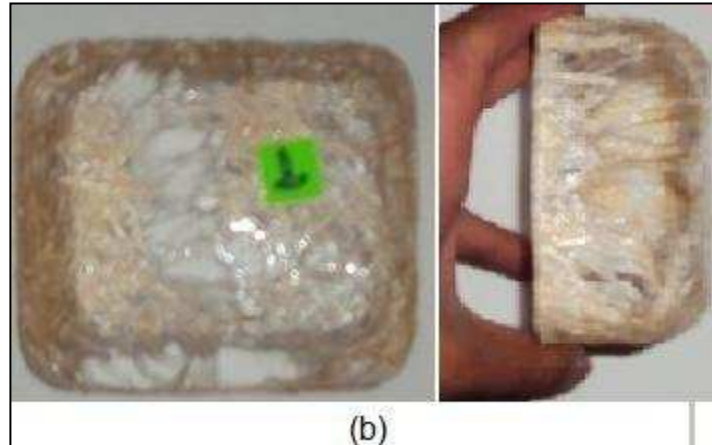


Figura 3.35. Fallas producidas en la base de la bandeja.

Por otro lado, cabe anotar que el molde fue elaborado para moldear láminas de alrededor 2,5 mm de espesor, por ese motivo cuando se fabrican prototipos de menores espesores, el sistema de corte de los bordes de las bandejas no funciona correctamente, por lo tanto se obtienen prototipos unidos al resto de la lámina los mismos que deben ser cortados para separarlos. Este fenómeno se muestra en la Figura 3.36.





Figura 3.36. Bandeja unida al resto de la lámina de material compuesto.

Sin embargo, los prototipos fueron elaborados siguiendo los pasos establecidos en el diagrama de procesos de la Figura 2.27. Los resultados finales de procesos y tiempos se presentan en la Figura 3.39. Asimismo en el ANEXO 3 se ejemplifica el proceso de elaboración completo del prototipo.

Por otro lado, es importante señalar que para el caso de láminas de PLA el espesor mínimo de lámina a termoformarse es de 0,5 mm, ya que en el moldeo por compresión no fue posible obtener menores espesores. Estos prototipos se muestran en la Figura 3.37. A diferencia de los prototipos a base de PLA en los materiales compuestos el mínimo espesor a termoformar es de 1,5 mm (Figura 3.39); debido a que en espesores menores la escasa cantidad de matriz de PLA no permite una correcta deformación de la matriz y la fibra. Esto también tiene una implicación directa en el acabado de las bandejas de material compuesto, las mismas que no alcanzaron el acabado superficial que se tenía con las láminas por moldeo por compresión. Esto se debe a que debido al termoformado el espesor de la lámina disminuye principalmente en las paredes de la bandeja (disminución aproximada de las dimensiones de un 10%), ocasionando que exista menor cantidad de matriz que cubra a las fibras, dando una sensación de desprendimiento de las fibras de la matriz de PLA.



Figura 3.37. Prototipos de PLA elaborados con láminas de 0,5; 1,0; 1,5 y 2,0 mm.

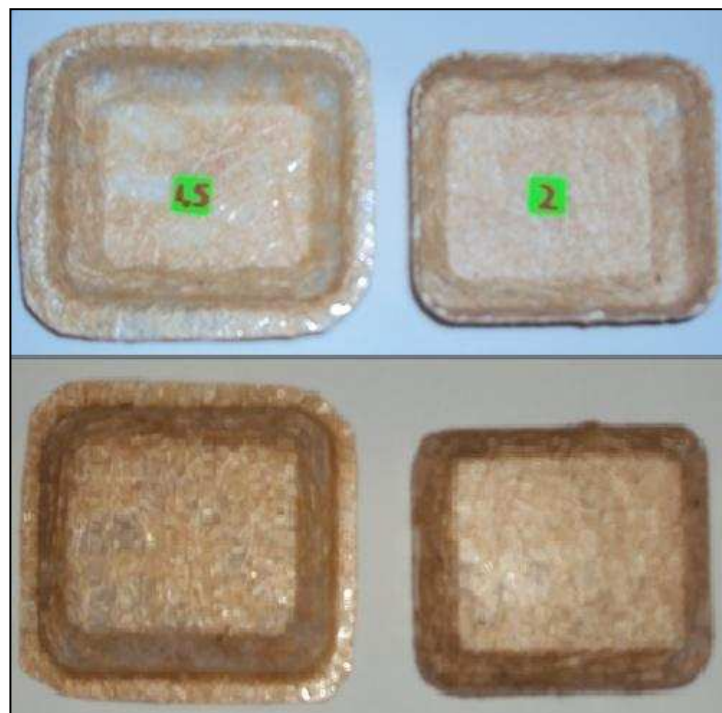


Figura 3.38. Prototipos elaborados a base de material compuesto reforzado con fibra dispersa de 10 mm al 0,13 de fracción volumétrica . Espesores 1,5 y 2,0 mm.



# Tarea	Tarea	Operación				Tiempo	Notas
		Operación	Transporte	Inspección	Almacenamiento		
1	Almacenamiento y secado PLA y fibras	○	↑	□	▽	2 horas	
2	Fabricación láminas	○	↑	□	▽	8-16 min	Ver Tablas 3.4 y 3.7
3	Inspección del acabado	○	↑	□	▽	15 s	Por cada lámina
4	Transporte láminas	○	↑	□	▽	2 min	LANUM-LAEV
5	Colocación del molde en la prensa	○	↑	□	▽	5 min	
6	Corte de láminas	○	↑	□	▽	1 min	
7	Calentamiento	○	↑	□	▽	1,5 - 3 min	Ver Tablas 3.21
8	Termoformado láminas	○	↑	□	▽	30 s	Por cada lámina
9	Corte bordes del prototipo	○	↑	□	▽	1 min	
10	Inspección del acabado	○	↑	□	▽	15 s	
11	Almacenamiento del producto	○	↑	□	▽	---	

Figura 3.39. Diagrama de flujo del proceso de producción del prototipo.

### 3.1.7. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Finalmente se estimó el costo de producción del prototipo. Se tomó en cuenta los costos de fabricación del molde, materia prima, mano de obra directa y servicios básicos, para la producción por unidades de cada prototipo, ya que se trata de un producto artesanal. Dentro de los costos de materia prima se presentan valores referenciales si el prototipo fuera fabricado con PLA puro, material compuesto de fibra dispersa y de polipropileno, con la finalidad de comparar los valores. Se toma en cuenta que las láminas de material serán de 2,5 mm. En el caso de la mano de obra se analiza el costo de pagar un operador que moldee las láminas y realice el termoformado de las mismas. Además, se da un resumen de los costos de servicios básicos utilizados en el moldeo tanto de láminas como en el termoformado. Finalmente, se suman estos valores presentados en las tablas y se obtiene el costo de fabricar cada una de las cajas de diferentes materiales.

Tabla 3.30. Costo de fabricación del molde de termoformado.

<b>Molde</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Costo unitario</b>
	<b>\$</b>
Molde para termoformado con sistema de guías	\$ 280,00

De acuerdo a la experiencia del termoformado de las láminas, el molde no sufre ningún tipo de desgaste en la hembra ni en el macho. Solamente pueden existir problemas de rozamiento entre las guías y los agujeros del prensa chapas si no se fija adecuadamente el macho sobre la hembra. Sin embargo, las características del molde fabricado lo hacen un instrumento solamente experimental utilizado para conocer el comportamiento del material a cambios de geometría. Por lo tanto, tomar en cuenta este rubro en el precio del producto sería exagerado e impreciso. Lo correcto sería utilizar moldes más baratos para fabricar el producto en serie. Un molde bajo estas condiciones fácilmente costaría el 10% del molde experimental y con esto el rubro cargado al producto debido al molde sería sumamente bajo.

Tabla 3.31. Costo de la materia prima de prototipos elaborados de PLA puro.

Material	Costo unitario (\$/g)	Cantidad de material x prototipo (g)	Costo \$
PLA	0,00257	175,59	0,45
		Costo total [USD]	0,45

Tabla 3.32. Costo de la materia prima de prototipos elaborados de material compuesto.

MATERIA PRIMA			
Material	Costo unitario (\$/g)	Cantidad de material x prototipo (g)	Costo \$
PLA	0,00257	140,47	0,36
Fibra de abacá	0,0012	36,82	0,04
		Costo total [USD]	0,41

Tabla 3.33. Costo de la materia prima de prototipos elaborados de polipropileno.

Material	Costo unitario (\$/g)	Cantidad de material x prototipo (g)	Costo \$
Polipropileno	0,0003	128,86	0,04
		Costo total [USD]	0,04

Tabla 3.34. Costo de los servicios básico utilizados.

Servicio	Cantidad x prototipo	Costo unitario	Costo
Agua*	m <sup>3</sup>	[USD]/m <sup>3</sup>	[USD]
	0,067	0,316	0,02
	Moldeo, secado, calentamiento	Costo unitario	Costo
Energía* Eléctrica	kWh	[USD]/kWh	[USD]
	3,12	0,079	0,25

\*Dentro del rubro de servicios básico se toma en cuenta la energía utilizada en la prensa calefactora y en la estufa para el secado de fibra y PLA. Para el caso del agua se toma en cuenta la utilizada para el enfriamiento del molde y la preparación de la fibra.

Tabla 3.35. Costo de la mano de obra por prototipo.

Mano de obra	Honorarios (\$/h)	Fabricación de láminas		
		PLA	material compuesto	polipropileno
Operador	2,00	\$ 0,33	\$ 0,40	\$ 0,33
		Termoformado de láminas		
		PLA	material compuesto	polipropileno
		\$ 0,07	\$ 0,08	\$ 0,07

Dentro de la mano de obra se toma en cuenta el tiempo tanto de la preparación de los insumos para fabricar los materiales, como el tiempo utilizado en el moldeo de las láminas, ya que mientras se moldea las láminas el operador puede realizar el tratamiento de la fibra explicado anteriormente.

Tabla 3.36. Costo de fabricación de cada producto.

Material	Mano de obra	Materiales	Servicios básicos	Costo total \$
PLA	0,40	0,45	0,27	1,12
Material compuesto	1,14	0,41	0,27	1,82
Polipropileno	0,40	0,04	0,27	0,71

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3.36, los productos elaborados a base de polipropileno son aquellos que muestran un menor valor, seguidos por los prototipos elaborados a base de PLA puro. Los más caros de elaborar son aquellos a base de material compuesto. Esto se debe principalmente a que elaborar estos materiales toma más tiempo, incrementando el rubro de mano de obra. Sin embargo, si observa los valores de materiales este presenta un ahorro frente a los de PLA puro. Por lo tanto, si se logra mejorar el método de procesamiento de estos materiales, el costo puede disminuirse y llegar a ser menor que los de matriz pura. Además es necesario notar que estos valores se

pueden reducir drásticamente si se disminuye la cantidad de desperdicio de material (Figura 3.36), ya que este corresponde al 80 % del volumen total de la lámina elaborada. Por lo tanto, los valores de tiempo de mano de obra, uso de servicios básicos también disminuirían. Una posible solución sería construir un molde más pequeño para producir láminas de menores dimensiones.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- Se cumplió con la mayoría de los objetivos planteados al inicio del estudio; solamente en el caso del prototipo no se fabricó el mismo con el material que presentaba las mejores propiedades mecánicas, ya que para seleccionarlo se tomaron en cuenta más factores y se fabricaron prototipos tanto de matriz de PLA pura como de material compuesto. En el caso de fabricar el producto con el material de mejores características se desperdiciarían las propiedades mecánicas del material y se complicaría la producción del mismo, ya que fabricar láminas de fibra continua unidireccional requiere mayor cuidado.
- Se determinó que el acabado del molde macho-hembra incide directamente con los defectos superficiales finales en las láminas elaboradas mediante moldeo por compresión. Por este motivo, se deben utilizar lijas de 100 y 200 para eliminar posibles defectos en las superficies donde el molde entra en contacto con la lámina.
- Para la elaboración de láminas ácido poliláctico (PLA) se definió la presión de moldeo en 6.000 psi, un tiempo de moldeo desde el calentamiento del molde con el material internamente hasta sacarlo de la prensa de 8 a 13 minutos dependiendo del espesor de lámina, la temperatura de las placas superior e inferior de la prensa Carver en 174°C (345°F) y 170°C (340°F) respectivamente, que representan una temperatura del material en el molde de aproximadamente 161,5°C y la presión de enfriamiento en 1.000 psi a temperatura ambiente.
- Para la elaboración de los materiales compuestos se definió la presión de moldeo en 3.000 psi, un tiempo de moldeo desde el calentamiento del molde con el material internamente hasta sacarlo de la prensa de 12 a 16

minutos dependiendo del espesor de lámina, la temperatura de las placas superior e inferior de la prensa CARVER en 174°C (345°F) y 170°C (340°F) respectivamente, y la presión de enfriamiento en 1.000 psi a temperatura ambiente.

- Se estableció que la fracción volumétrica mínima y máxima de fibra de abacá en la matriz de ácido poliláctico es del 13 y 20%, respectivamente. Con esto se garantizó que los materiales compuestos elaborados estaban en el rango adecuado donde la fibra podía generar un incremento de las propiedades de la matriz. Con estos porcentajes se fabricaron probetas normalizadas para ensayos mecánicos, tanto de fibra dispersa de 10 mm como de fibra continua unidireccional.
- Se caracterizaron las probetas tanto de matriz de ácido poliláctico puro como de los materiales compuestos. Los datos recabados en su mayoría seguían una distribución normal excepto para la deformación máxima en el ensayo de flexión. En general se presentaron los siguientes resultados:

### **Tracción**

- Las curvas esfuerzo vs. deformación tanto para la matriz como para los materiales compuestos, presentaron una tendencia lineal evidenciando un comportamiento netamente frágil de los materiales. Este resultado concuerda con lo revisado en la bibliografía ya que el PLA y sus biocompuestos son materiales que se caracterizan por su alta resistencia y bajo porcentaje de elongación.
- La formulación de material compuesto de abacá-ácido poliláctico que presentó las mejores propiedades mecánicas en tracción fue la correspondiente a la configuración de fibra continua unidireccional y de fracción volumétrica de refuerzo de 0,20, formulación que permitió al compuesto superar las propiedades mecánicas de la matriz de ácido poliláctico en aproximadamente el 165% en la resistencia máxima a la tracción (132 MPa), 130% en el módulo de elasticidad (9.223 MPa). Estos valores permitieron superar las propiedades mecánicas a tracción de resistencia y módulos de elasticidad de algunos plásticos comunes en la industria como el

PET (50 MPa-1.700 MPa), el polietileno de alta densidad (10-60 MPa-60.290 MPa), el polipropileno (26 MPa-1.389 MPa). Para el caso de materiales compuestos las propiedades obtenidas en el estudio para la mejor formulación, los resultados son comparables a los materiales híbridos de abacá/fibra de vidrio y resina poliéster y son muy superiores a los compuestos de polietileno reforzados con fibra de abacá. Para el caso de bicompuestos con PLA como matriz, los resultados obtenidos en la mejor formulación dan valores comparables a los alcanzados en la resistencia a la tracción con el refuerzo de lino (70 MPa), algodón y yute (100 MPa).

### **Flexión**

- Las curvas esfuerzo vs. deformación tanto para la matriz como para los materiales compuestos, presentaron una tendencia lineal evidenciando un comportamiento netamente frágil de los materiales.
- La formulación de material compuesto de abacá-ácido poliláctico que presentó las mejores propiedades mecánicas en flexión fue la correspondiente a la configuración de fibra continua unidireccional y de fracción volumétrica de refuerzo de 0,20, formulación que permitió al compuesto superar las propiedades mecánicas de la matriz de ácido poliláctico en aproximadamente el 50 % en la resistencia máxima a la flexión (104,4 MPa) y 100 % en el módulo de elasticidad (5.570 MPa).
- En cuanto a la deformación máxima los materiales compuestos no presentaron una variación considerable respecto al comportamiento de la matriz de ácido poliláctico, tal y como se esperaba de acuerdo a la información bibliográfica recopilada respecto a las propiedades del ácido poliláctico.

### **Impacto**

- En cuanto a la resistencia al impacto los materiales compuestos aumentaron significativamente respecto a la matriz de ácido



poliláctico. Tanto para probetas muescada como no muescadas los valores de resistencia al impacto fueron similares, evidenciándose un aumento del 100 y 200% para materiales reforzados con fibra continua unidireccional con una fracción volumétrica del 0,20.

- Se constató que al termoformar el PLA se debe tener cuidado en el desarrollo de aplicaciones, ya que debido a su naturaleza frágil se pueden obtener diferentes fallas en los cambios de secciones bruscas. Asimismo, los moldes para termoformarlo deben constar con sistemas de prensa chapas para evitar que el material se contraiga al momento del enfriamiento de la lámina.
- Se definió que para el caso de láminas de PLA puro el espesor mínimo a termoformar es 0,5 mm y para el caso de materiales compuestos reforzados con fibra corta dispersa de 10 mm el espesor mínimo es de 1,5 mm, debido a que en el momento del termoformado las láminas pierden un 20% de su espesor.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Se propone llevar a cabo un estudio más profundo y completo acerca de la inclusión de tejidos bidimensionales y tridimensionales reforzando este tipo de materiales. Esto permitiría, de acuerdo a lo visto en otros estudios, mejorar las propiedades mecánicas de los materiales y por ende sus posibles aplicaciones, además de tener un completo conocimiento de la incidencia de añadir fibras en matrices biodegradables.
- Realizar un tratamiento especial a las fibras para mejorar la adhesividad de estas sobre la matriz de ácido poliláctico. Esto permitirá mejorar la eficiencia del refuerzo de abacá. Además, realizar estudios con otras fibras naturales, como la fibra de coco, cabuya, para comprobar si estas presentan un mejor desempeño que el abacá sobre el PLA.
- Impulsar la generación de más aplicaciones utilizando los resultados alcanzados en el presente estudio. Sería necesario buscar nuevos y más

eficientes métodos de procesamiento con la finalidad de aprovechar los resultados obtenidos y disminuir el costo de los productos que se elaboren.

## BIBLIOGRAFÍA

- PLATT, D; Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006.
- BASTIOLI, C; Handbook of Biodegradable Polymers; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2005.
- HENTON, DE; GRUBER, P; LUN, J; RANDALL, J; Polylactic acid technology; Natural fibers, biopolymers, and biocomposites; Boca Raton, FL: Taylor & Francis; 2005; p. 527–77.
- REES, H; Understanding injection molding technology; Cincinnati: Hanser/Gardner publication; 1995.
- SATO, Y; INOHARA, K; TAKISHIMA, S; MASUOKA, H; IMAIZUMI; YAMAMOTO, H; Pressure–volume–temperature behavior of polylactide, poly(butylene succinate), and poly(butylene succinate-co-adipate); Polym Eng Sci 2000.
- CINK, K; BOPP, RC, SIKKEMA, K; Injection stretch blowmolding process using polylactide resins; WO Patent 2006/002409; 2006.
- PICKERING, KIM; Properties and performance of natural-fibre composites; Woodhead Publishing Limited; Cambridge- England; 2008.
- MOHANTY, A; MISRA, M; DRZAL, L; Natural fibers, biopolymers, and biocomposites; Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
- AURAS, R; LIM, L; SELKE, S; TSUJI, H; Poly (lactic acid) Synthesis, structures, properties, processing, and application; Wiley Series; New Jersey, 2010.
- ROBY, M.S; Proceedings of Biopolymers-Advances in Medical and Material Science Applications, Cambridge, MA, USA, 2001.
- YU, L; J; Biodegradable polymer blends and composites from renewable resources; Wiley; 2009, New Jersey, USA.
- GRIJPMAN, D; ALTEPER, H; Improvement of the mechanical properties of poly (D,L-lactide) by orientation; Polymer International; volume 51; p: 845-851; 2002.

- OSSWALD, T; Polymer Processing Fundamentals, Hanser Gardner Publications, Ind. Cincinnati, OH; 1998.
- GUERRERO, V; et al.; Nuevos Materiales: aplicaciones estructurales e industriales; Escuela Politécnica Nacional; Imprefepp; Quito-Ecuador, 2011.
- MALLICK, P.K.; Fiber-reinforced composites; Taylor & Francis Group, LLC; University of Michigan-Dearborn; 2007.

### **Publicaciones:**

- LIM, L; AURAS, R; Processing technologies for poly(lactic acid); University of Guelph-Canadá; Elsevier; 2008.
- LEE, BYOUNG; KIM, HEE-SOO; LEE, SENA; Bio-composites of kenaf fibers in polylactide:Role of improved interfacial adhesion in the carding process; Seoul National University; Republic of Korea; 2009.
- MARK, J; Polymer Data Handbook; Oxford University Press, Inc ; 1.999.
- MADHAVAN, NAMPOOTHIRI; NIMISHA, RAJENDRAN; ROJAN, PAPPY; An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research; National Institute for Interdisciplinary Science and Technology (NIIST); India; Elsevier; 2010.
- TAMAYO, A; Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras de cabuya; Laboratorio de Nuevos Materiales; Escuela Politécnica Nacional; Quito, Noviembre; 2011.
- AIGNER, C; Oriented Films continue their successful run-even with PLA; Bioplastics Magazine Review; vol. 2; marzo-2007; p. 25.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) Direcciones Provinciales and 2006 Agencias de Servicio Agropecuario, Balance de Alimentos.
- BLEDZKI, A; JASZKIEWICZ, A; SCHERZER, D; Mechanical properties of PLA composites with man. Made cellulose and abaca fibers; university of Kassel; Institute fur Werkstofftechnik; Elsevier; Germany, 2009.

### **Proyectos de titulación:**

- MONTERO,P;NARANJO,I; Plásticos reforzados con fibra de abacá; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Diciembre-1988.
- SALAS, A; Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; Febrero-2009.
- MOSCOSO, 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.

#### Internet:

- <http://www.ttnet.net/ttnet/gotoprd/SO200/030/0/25151303137323630343.htm>
- [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/medicina/polimeros\\_biodegradables.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/medicina/polimeros_biodegradables.htm)
- Manual Técnico de Termoformado; Plastiglas de México, S.A; 04-2011.
- <http://www.textoscientificos.com/polimeros/biogenerados>
- <http://ecuabusiness.blogspot.com/2008/09/supermaxi-se-pasa-fundas-biodegradables.html>
- Revista tecnológica del plástico; “En la era de los biodegradables”; Vol. 20; Edición 1, enero - febrero 2005; Ángela Barriga Salamanca. <http://www.biopackcolombia.com/media/revisplastico.htm>
- Maizar- Asociación Maíz y Sorgo Argentino; 2.006 <http://www.maizar.org.ar/vertext.php?>
- <http://ecuabusiness.blogspot.com/2008/09/supermaxi-se-pasa-fundas-biodegradables.html>

## ANEXOS

<b>ANEXO 1.</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISIS COMPARATIVO ANOVA .....</b>	<b>183</b>
<b>A1.1.</b>	<b>ENSAYO DE TRACCIÓN .....</b>	<b>184</b>
<b>A1.2.</b>	<b>ENSAYO DE FLEXIÓN .....</b>	<b>186</b>
<b>A1.3.</b>	<b>ENSAYO DE IMPACTO .....</b>	<b>189</b>
<b>ANEXO 2.</b>	<b>PLANOS DEL MOLDE DE TERMOFORMADO .....</b>	<b>194</b>
<b>ANEXO 3.</b>	<b>PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>195</b>
<b>ANEXO 4.</b>	<b>FICHA TÉCNICA DEL ÁCIDO POLILÁCTICO.....</b>	<b>196</b>

## ANEXO 1. MÉTODO DE ANÁLISIS COMPARATIVO ANOVA

Para llevar a cabo el análisis comparativo de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos ensayados, se utilizó el procedimiento estadístico de análisis de varianza (ANOVA), con la ayuda de Excell 2010, MatLab 7.0 y Statgwin Plus 5.1. Para el desarrollo del análisis fue necesario definir el nivel de confianza a considerarse, el mismo que fue del 95 %, debido a que los parámetros en el moldeo por compresión eran difíciles de controlar y además las propiedades de las fibras de abacá utilizadas no eran constantes, ya que dependían de diversos factores como suelo, clima, plantación, edad, plagas y otras.

Para poder utilizar el método ANOVA de comparación de datos se debían cumplir las tres hipótesis en las que se basa este análisis:

- Para cada población, la variable de respuesta está normalmente distribuida.
- La varianza de la variable de respuesta, representada por  $\sigma^2$ , es la misma para todas las poblaciones.
- Las observaciones deben ser independientes.

El objetivo del ANOVA era comprobar la hipótesis nula, la cual afirma las hipótesis anteriores principalmente aquella donde se afirma que las medias de los tratamientos son iguales. Si se rechaza la hipótesis nula significaba que todas las medias poblacionales eran distintas o que al menos dos medias poblacionales tenían distintos valores. Para afirmar o rechazar la hipótesis nula el ANOVA efectúa la prueba F que consiste en la relación entre el estimado de la varianza poblacional entre tratamientos y el estimado de la varianza poblacional dentro de tratamientos (MSRT/MSE). El valor de F que haga rechazar la hipótesis nula depende de un valor crítico, el mismo que viene dado por el nivel de significancia. Este nivel de significancia depende a su vez del nivel de confianza del estudio definido anteriormente del 95%.

Para el caso en el cual la hipótesis nula era rechazada, difícilmente se conocía cuales valores eran estadísticamente diferentes. Por lo tanto, en esta situación se recurría al procedimiento de las diferencias menos significativas (LSD: least-significant difference ) de Fisher para determinar donde estaban estas diferencias.

El valor de LSD se calculaba mediante la ecuación:

$$LSD = t_{\alpha/2} \sqrt{MSE \left( \frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

Donde  $t_{\alpha/2}$ : Valor de T en la distribución t de Student, para un nivel de significancia  $\alpha/2$  y grados de libertad  $(n_T - k)$ ,  $n_T$ : corresponde al número total de observaciones de los k tratamientos efectuados, MSE: varianza poblacional dentro de tratamientos,  $n_i$ : número de observaciones del tratamiento i y  $n_j$ : número de observaciones del tratamiento j

Si el valor absoluto entre la diferencia de las dos medias estudiadas es mayor al LSD, se decía que las medias eran estadísticamente diferentes. Así se procedía a analizar el gráfico de cajas y bigotes de las muestras.

A continuación se presentan las gráficas de medias y cajas y bigotes para los diferentes resultados obtenidos en los ensayos realizados en el estudio.

### **A1.1. ENSAYO DE TRACCIÓN**

En las figuras siguientes se presentan los diagramas de medias de los materiales compuestos de fibra de abacá y matriz de ácido poliláctico en función de la fracción volumétrica y de la orientación de fibra, para cada una de las propiedades estudiadas en el ensayo de tracción. Además, en la Tabla A.1 se resume el análisis estadístico llevado a cabo en los resultados.



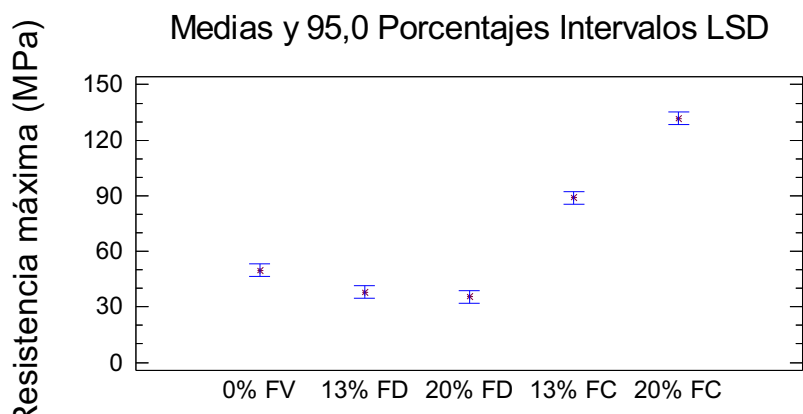


Figura A.1. Resistencia máxima a la tracción de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.1 el análisis estadístico ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el esfuerzo máximo a la tracción de la matriz de ácido poliláctico puro y de los materiales compuestos elaborados con fibra corta y continua. Sin embargo, al comparar los valores de resistencia máxima obtenidos del material compuesto a diferentes concentraciones volumétricas con fibra corta dispersa se estableció que no existía una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de esfuerzo máximo a medida que se aumentaba la fracción de fibra. Siendo no el caso para los materiales elaborados con fibra continua unidireccional donde conforme se aumentaba la fracción volumétrica de fibra los valores de esfuerzo se ampliaron.

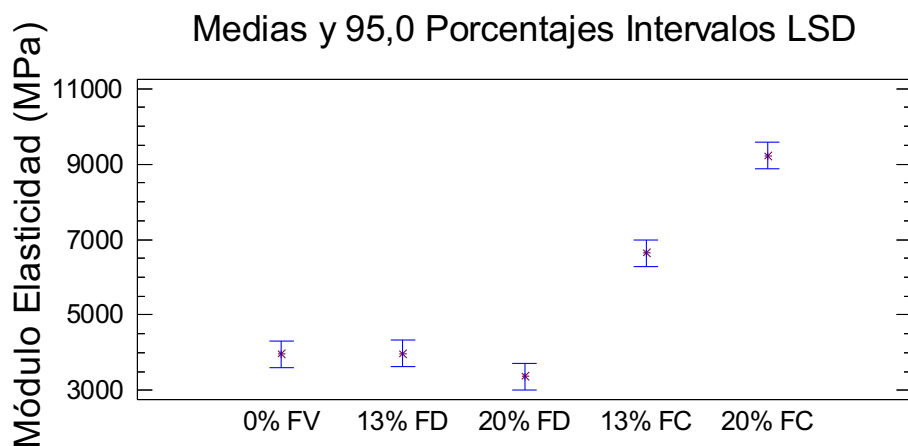


Figura A.2. Módulo de elasticidad a la tracción de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.2 el análisis estadístico ANOVA permitió establecer que no existe diferencia estadísticamente significativa entre el módulo de elasticidad de la matriz de ácido poliláctico puro y de los materiales compuestos elaborados con fibra corta de 10 mm. En cambio respecto a los materiales compuestos elaborados con fibra continua unidireccional si hubo diferencia significativa. Además, para el caso del módulo de elasticidad se obtuvo que conforme se aumentó el volumen de fibra en el material compuesto los valores no aumentaron ni disminuyeron de una manera representativa en el caso de la fibra corta a diferencia de la fibra continua donde junto con el aumento de la fracción de fibra el módulo de elasticidad se incrementó.

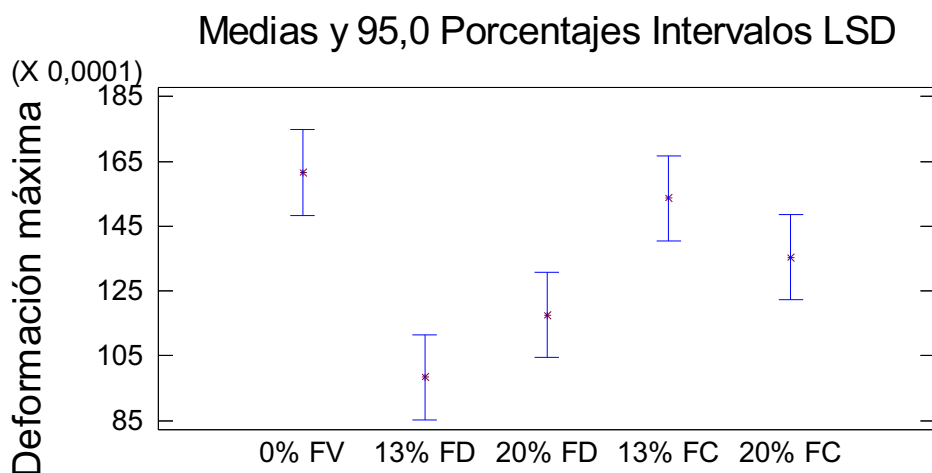


Figura A.3. Deformación máxima a la tracción de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.3 el análisis estadístico permitió conocer que existió una diferencia estadísticamente significativa entre la deformación máxima de la matriz de ácido poliláctico puro y de los materiales compuestos elaborados con fibra corta dispersa de 10 mm ; mientras que con los valores de los materiales elaborados con fibra continua unidireccional no hubo una diferencia significativa.

## A1.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

En las figuras siguientes se muestran los diagramas de medias de los materiales compuestos de fibra de abacá y matriz de ácido poliláctico en función de la

fracción volumétrica y de la orientación de fibra, para cada una de las propiedades estudiadas en el ensayo de flexión. Además, en la Tabla A.1 se resume el análisis estadístico llevado a cabo en los resultados.

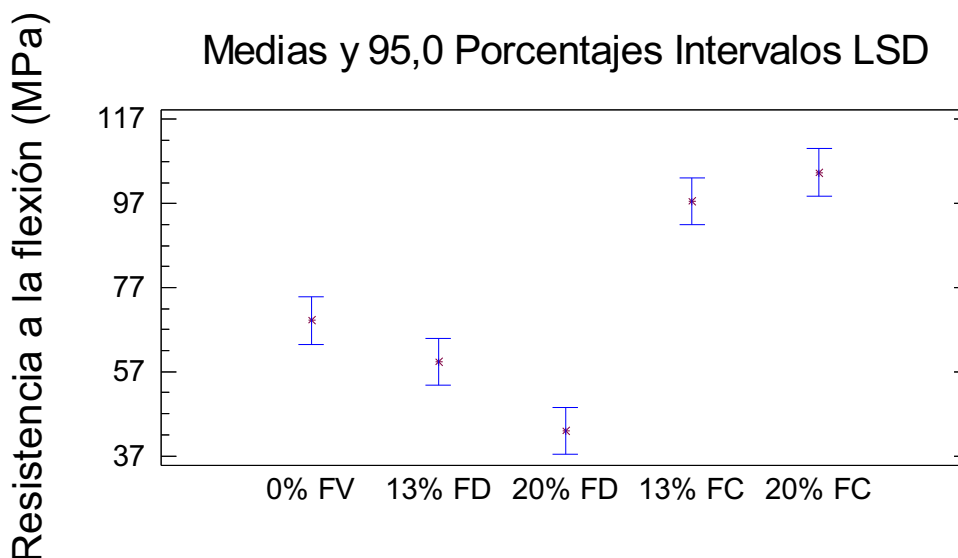


Figura A.4. Resistencia máxima a la flexión de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.4 el análisis estadístico ANOVA permitió conocer que existió una diferencia estadísticamente significativa entre el esfuerzo máximo a la flexión de la matriz de ácido poliláctico puro y de los materiales compuestos elaborados con fibra corta dispersa de 10 mm y fibra continua unidireccional. Igualmente, sucedió que mientras se aumentaba el porcentaje de fibra en la matriz existían diferencias significativas entre las resistencias a la flexión, el mismo que disminuía conforme se aumentaba la fracción de fibra corta en la matriz sucediendo lo contrario para la fibra continua unidireccional.

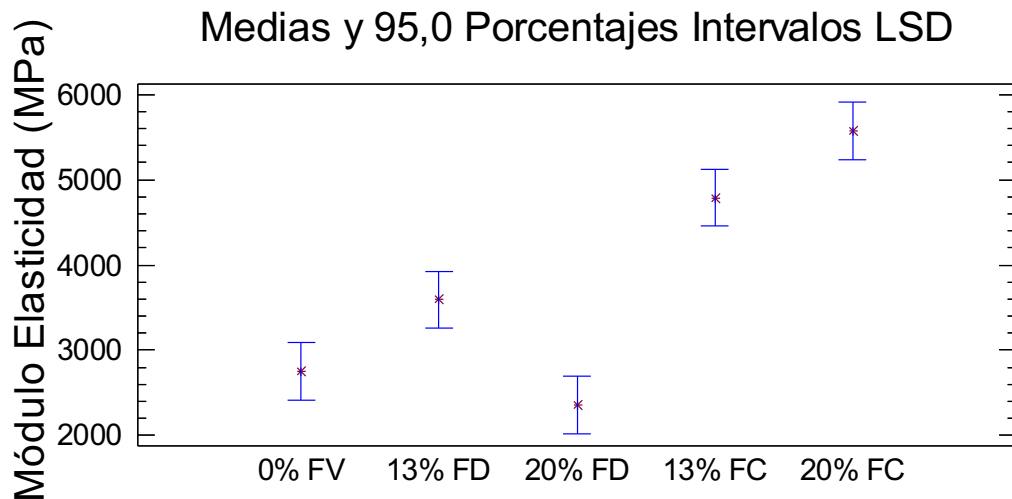


Figura A.5. Módulo de elasticidad a la flexión de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.5 el análisis estadístico ANOVA permitió conocer que existió una diferencia estadísticamente significativa entre el esfuerzo máximo a la flexión de la matriz de ácido poliláctico puro y de los materiales compuestos elaborados con fibra corta dispersa de 10 mm y fibra continua unidireccional. En el caso de la fibra continua unidireccional el módulo de elasticidad a la flexión aumentaba conforme era mayor la fracción volumétrica de fibra en la matriz.

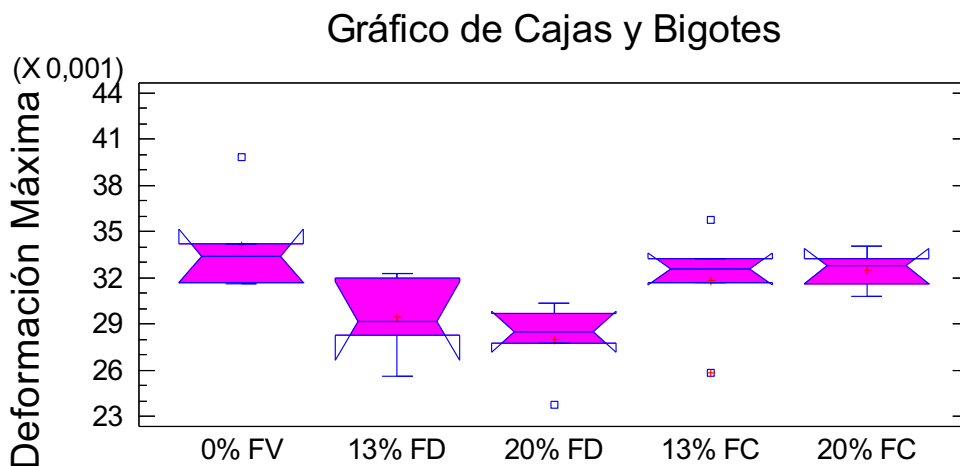


Figura A. 6. Deformación máxima a la flexión de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

Para el caso de la deformación máxima a flexión los resultados no tenían una tendencia normal por lo que no se pudo obtener el gráfico de medias y realizar el método ANOVA de análisis estadístico. Por lo tanto, se empleó la versión no paramétrica correspondiente al método de Kruskal- Wallis y se obtuvo el gráfico de cajas y bigotes que se muestra en la Figura A. 6.

### A1.3. ENSAYO DE IMPACTO

En las figuras siguientes se muestran los diagramas de medias de los materiales compuestos de fibra de abacá y matriz de ácido poliláctico en función de la fracción volumétrica y de la orientación de fibra, para cada una de las propiedades estudiadas en el ensayo de flexión. Además, en la Tabla A.1 se resume el análisis estadístico llevado a cabo en los resultados.

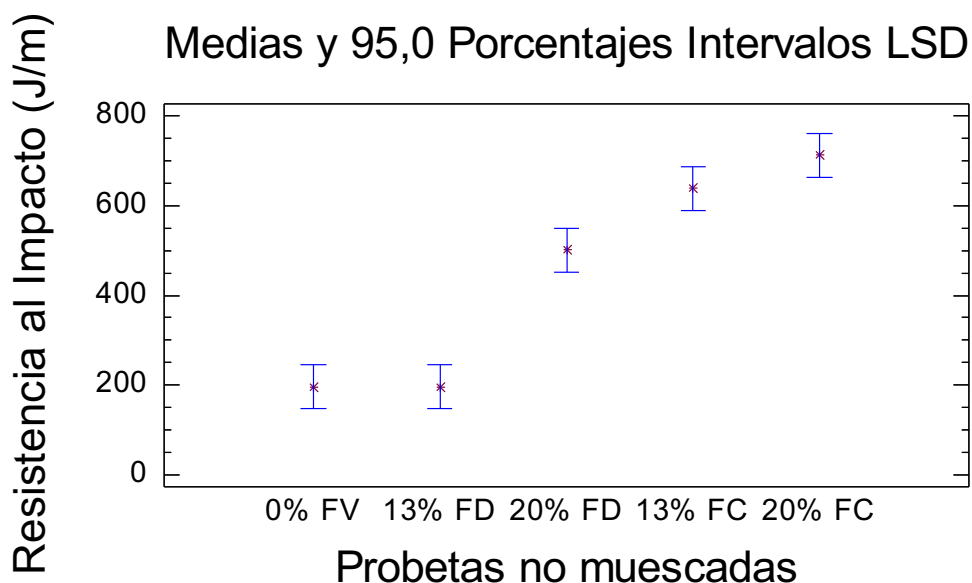


Figura A.7. Resistencia al impacto de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.7 el análisis estadístico permitió conocer que existió una diferencia estadísticamente significativa entre la resistencia al impacto de la matriz de ácido poliláctico puro con los materiales compuesto de fibra tanto dispersa como continua en sus diferentes concentraciones. A diferencia de lo sucedido en las propiedades a tracción y flexión los resultados obtenidos con las diferentes

configuraciones no sufren mayores cambios. Se verifica un aumento de la resistencia al impacto tanto en refuerzo de fibra corta como de fibra continua orientada longitudinalmente.

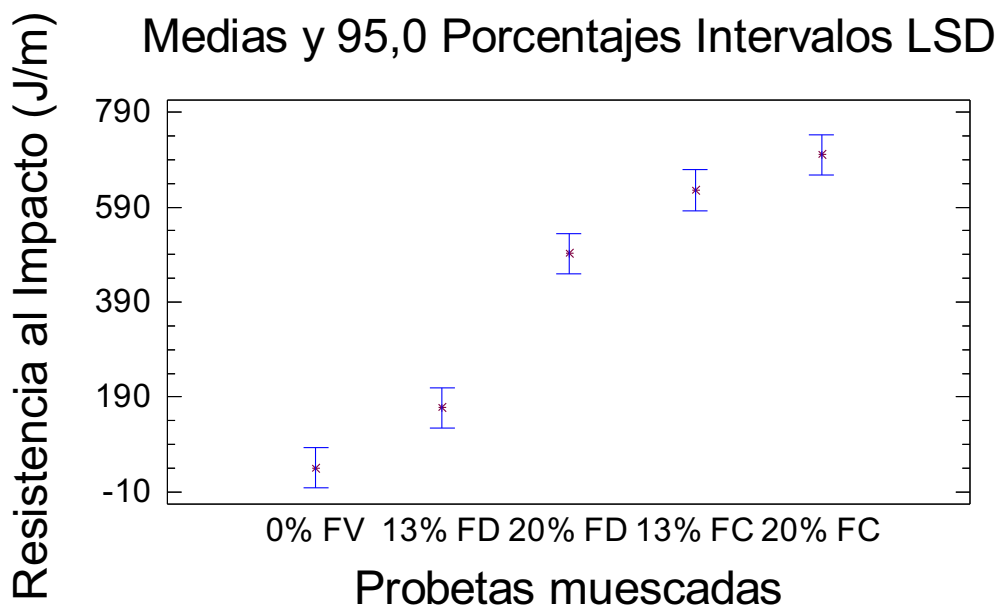


Figura A.8. Resistencia al impacto de materiales compuestos de fibra corta de abacá de 10 mm y fibra continua unidireccional en función de la fracción volumétrica.

En la Figura A.8 el análisis estadístico permitió conocer que si existió una diferencia estadísticamente significativa entre la resistencia al impacto de la matriz de ácido poliláctico puro con los materiales compuesto de fibra tanto dispersa como continua en sus diferentes concentraciones. Igualmente, tal y como sucedió con las probetas muescadas los valores de resistencia aumentaban conforme al crecimiento de la cantidad de fibra depositada en la matriz.



Tabla A.1. Continuación

Ensayo de tracción		Deformación máxima					
		Matriz PLA	13 % fibra corta	20% fibra corta	13 % fibra continua	20 % fibra continua	20 % fibra continua
Probeta							
1	0,0120	0,0092	0,0120	0,0170	0,0154	0,0154	
2	0,0208	0,0102	0,0140	0,0150	0,0147	0,0147	
3	0,0154	0,0098	0,0134	0,0146	0,0116	0,0116	
4	0,0170	0,0118	0,0098	0,0164	0,0130	0,0130	
5	0,0156	0,0082	0,0096	0,0138	0,0130	0,0130	
Promedio:	0,0162	0,0098	0,0118	0,0154	0,0135	0,0135	
Desviación estándar	0,0032	0,0013	0,0020	0,0013	0,0015	0,0015	
Coefficiente de variación	19,67%	13,51%	17,15%	8,56%	11,05%	11,05%	
Ensayo de flexión		Resistencia máxima (MPa)					
		Matriz PLA	13 % fibra corta	20% fibra corta	13 % fibra continua	20 % fibra continua	20 % fibra continua
Probeta							
1	60,91	60,10	37,01	107,46	95,52	95,52	
2	62,85	61,01	44,18	84,34	106,77	106,77	
3	71,23	64,57	43,48	117,04	112,09	112,09	
4	71,56	55,66	50,55	82,90	108,29	108,29	
5	79,33	55,66	39,74	95,63	99,42	99,42	
Promedio:	69,18	59,40	42,99	97,47	104,42	104,42	
Desviación estándar	7,44	3,80	5,13	14,76	6,77	6,77	
Coefficiente de variación	10,75%	6,40%	11,92%	15,14%	6,49%	6,49%	



Tabla A.1. Continuación

Ensayo de flexión		Módulo de elasticidad (MPa)					
		Matriz PLA	13 % fibra corta	20% fibra corta	13 % fibra continua	20 % fibra continua	
Probeta							
1		2175,20	3474,90	1903,68	4682,61	5040,68	
2		2570,29	3659,17	2184,91	4312,43	6246,00	
3		2928,41	3802,58	2338,91	3813,51	5220,53	
4		2861,83	3451,32	2527,70	4282,33	5845,44	
5		3238,65	3571,70	2841,48	4367,75	5499,36	
Promedio:		2754,88	3591,93	2359,34	4291,73	5570,40	
Desviación estándar		401,77	143,85	353,30	311,36	484,80	
Coefficiente de variación		14,58%	4,00%	14,97%	7,25%	8,70%	
<b>Ensayo de flexión</b>		<b>Deformación máxima</b>					
Probeta							
1		0,0334	0,0283	0,0285	0,0332	0,0316	
2		0,0317	0,0256	0,0297	0,0259	0,0332	
3		0,0398	0,0323	0,0303	0,0358	0,0308	
4		0,0316	0,0292	0,0238	0,0326	0,0328	
5		0,0342	0,0320	0,0278	0,0317	0,0341	
Promedio:		0,0341	0,0295	0,0280	0,0318	0,0325	
Desviación estándar		0,0034	0,0028	0,0026	0,0037	0,0013	
Coefficiente de variación		9,82%	9,42%	9,14%	11,50%	4,05%	

Tabla A.1. Continuación





Impacto (no muescadas)	Resistencia al impacto (J/m)				
	Matriz PLA	13 % fibra corta	20% fibra corta	13 % fibra continua	20 % fibra continua
Probeta	207,17	195,29	525,05	644,22	699,42
1	195,50	153,63	550,63	619,01	933,73
2	167,65	165,85	549,24	643,23	705,87
3	209,78	231,20	349,61	656,55	593,57
4	204,61	236,43	526,57	622,52	625,27
5	196,94	196,48	500,22	637,10	711,57
Promedio:	17,24	37,34	85,06	15,86	133,14
Desviación estándar	8,75%	19,01%	17,00%	2,49%	18,71%
Coefficiente de variación					
Impacto ( muescadas)	Resistencia al impacto (J/m)				
	Matriz PLA	13 % fibra corta	20% fibra corta	13 % fibra continua	20 % fibra continua
Probeta	41,20	164,76	454,60	643,98	669,32
1	41,89	166,72	522,09	607,76	581,88
2	40,25	163,65	515,28	644,76	696,11
3	43,34	172,74	517,25	634,64	932,87
4	35,35	168,27	452,33	596,03	620,69
5	40,41	167,23	492,31	625,43	700,17
Promedio:	3,04	3,56	35,55	22,25	137,32
Desviación estándar	7,53%	2,13%	7,22%	3,56%	19,61%
Coefficiente de variación					

**ANEXO 2. PLANOS DEL MOLDE DE TERMOFORMADO**

### ANEXO 3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS MATERIALES

A continuación en la Tabla A3.1 se presenta el procedimiento a seguir para la elaboración de láminas de PLA puro mediante moldeo por compresión. Es necesario indicar que estos procesos y sus valores han sido expuestos en los acápites 2.2.1.1 y 3.1.1 de este estudio, respectivamente. Por lo tanto, al momento de aplicar el procedimiento es necesario revisar las tablas de estos acápites para aplicar los tiempos, presiones y temperaturas correctas.


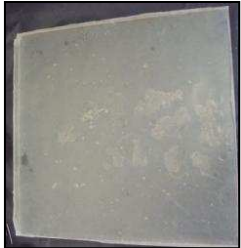




Tabla A3.1. Elaboración de láminas de PLA puro mediante moldeo por compresión manual.







Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Almacenamiento	Temperatura ambiente. Se recomienda mantener el PLA en condiciones ambientales menores a 60°C y 80% HR.	
2	Secado del PLA	Temperatura de secado: 70 °C. Tiempo de secado: 2 horas	
3	Pesaje de la cantidad de material	Depende del espesor de lámina a realizar	
4	Preparación del molde	Pre calentamiento y aplicación de cera desmoldante	

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
5	Colocación de pellets en el molde	Distribución uniforme de pellets en la hembra del molde	
6	Cerrado del molde	Colocación de placas de aluminio sobre el macho del molde	
7	Ingreso del molde en la prensa calefactora	Temperaturas fijadas en la prensa: Ts: 345°F Ti: 340°F	
8	Calentamiento y moldeo de las láminas	tiempo: depende del espesor de lámina.  presión aplicada: depende del espesor de lámina.	
9	Enfriamiento	(a)Enfriamiento acelerado: acción del agua  (b)Enfriamiento lento con presión	
10	Desmoldeo de la lámina		

En la Tabla A3.2 se presenta el procedimiento a seguir para la elaboración de láminas de material compuesto mediante moldeo por compresión. Es necesario indicar que estos procesos y sus valores han sido expuestos en los acápites 2.2.1.2 y 3.1.2 de este estudio, respectivamente. Por lo tanto, al momento de aplicar el procedimiento es necesario revisar las tablas de estos acápites para aplicar los tiempos, presiones y temperaturas correctas.

Tabla A3.2. Proceso de elaboración de láminas de material compuesto.

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Almacenamiento	<p>Temperatura ambiente.</p> <p>Se recomienda mantener la fibra de abacá bajo condiciones de baja humedad menores al 50% HR.</p>	
2	Almacenamiento láminas de PLA pre-elaboradas	<p>Se recomienda evitar tenerlas almacenada por tiempos prolongados. Para el espesor de las láminas.</p>	
3	Acondicionamiento de la fibra	<p>(a)Corte de fibra en 10 mm</p> <p>(b)Mojado y estiramiento de fibras largas de 340 mm</p>	 
4	Secado de la fibra	<p>Temperatura de secado: 70 °C.</p> <p>(a)Tiempo de secado:4 horas</p> <p>(b) Tiempo de secado: 12 horas</p>	 

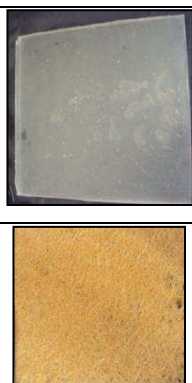



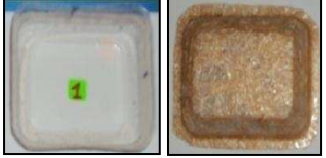
Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
5	Moldeo tipo sánduche	Colocación de la fibra sobre la primera lámina de PLA	
			
		Distribución homogénea de las fibras sobre la lámina	
			
		Colocación de la segunda lámina de PLA	
			

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
6	Cerrado del molde	Colocación de placas de aluminio sobre el macho del molde	
7	Ingreso del molde en la prensa calefactora	Temperaturas fijadas en la prensa: Ts: 345°F Ti: 340°F	
8	Calentamiento y moldeo de las láminas	tiempo: depende del espesor de placa .  presión aplicada: depende del espesor de placa .	
9	Enfriamiento	Enfriamiento lento con presión	
10	Desmoldeo de la lámina		
			



A continuación en la Tabla A3.3 se presenta el procedimiento a seguir para la elaboración del producto. Es necesario indicar que estos procesos y sus valores han sido expuestos en el diagrama de flujo de la Figura 3.39 de este estudio, respectivamente. Por lo tanto, al momento de aplicar el procedimiento es necesario revisar estos valores para aplicar los tiempos y temperaturas correctos.

Tabla A3.3. Elaboración del prototipo.

Ítem	Proceso	Acciones	Imagen
1	Almacenamiento láminas de PLA y material compuesto pre-elaboradas	Mantenerlas en condiciones normales	
2	Colocación del molde en la máquina universal de ensayos	Macho en el cabezal fijo y hembra en el cabezal móvil	
4	Calentamiento de las láminas	Temperatura de la estufa 270°C	
5	Termoformado de las láminas	Velocidad de avance del cabezal fijo de la máquina	
6	Producto final		

## ANEXO 4. FICHA TÉCNICA DEL ÁCIDO POLILÁCTICO



### NatureWorks® PLA Polymer 2002D

#### Extrusion/Thermoforming

NatureWorks® PLA polymer 2002D, a NatureWorks LLC product, is a thermoplastic resin derived from annually renewable resources and is specifically designed for extrusion/thermoforming applications. PLA polymer 2002D is a clear extrusion sheet grade and processes easily on conventional extrusion and thermoforming equipment. See table at right for properties.

#### Applications

Potential applications for PLA polymer 2002D include:

- Dairy containers
- Food serviceware
- Transparent food containers
- Blister packaging
- Cold drink cups

#### Processing Information

PLA polymer 2002D is easily processed on conventional extrusion equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. More detailed recommendations and processing requirements are found in the NatureWorks® PLA sheet extrusion processing guide, the purging technical data sheet, and the drying and crystallizing processing guide; all of which can be found at [www.natureworkslc.com](http://www.natureworkslc.com).

#### Machine Configuration

PLA polymer 2002D will process on conventional extrusion machinery with the following equipment: General purpose screw with L/D ratios from 24:1 to 32:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended.

Typical Material & Application Properties <sup>(1)</sup>		
Physical Properties	PLA Polymer 2002D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
Melt Index, g/10 min (210°C/2.16kg)	5-7	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break, psi (MPa)	7,700 (53)	D882
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8,700 (60)	D882
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	500 (3.5)	D882
Tensile Elongation, %	6.0	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.24 (12.81)	D256
Shrinkage is similar to PET <sup>(2)</sup>		

- (1) Typical properties; not to be construed as specifications.  
 (2) Refer to NatureWorks® PLA Sheet Extrusion Processing Guide

#### Process Details

##### Startup and Shutdown

PLA polymer 2002D is not compatible with a wide variety of commodity resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce PLA polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once PLA polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

##### Drying

In-line drying may be required. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions for crystallized granules are 2 hours at 195°F (90°C) or to a dew point of -40°F (-40°C), airflow rate of greater than 0.5 cfm/lbs per hour of resin throughput. The resin should not be

exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

Pellets that have been exposed to the atmosphere for extended time periods will require additional drying time. Amorphous regrind must be crystallized prior to drying, to assure efficient and effective drying.

Processing Temperature Profile <sup>(1)</sup>		
Melt Temperature	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temperature	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	375°F	190°C
Screw Speed	20-100 rpm	