

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPUESTOS BIODEGRADABLES ELABORADOS A BASE DE ÁCIDO POLILÁCTICO REFORZADOS CON FIBRAS DE ABACÁ

Ponce S.\*; Guerrero V.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica  
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2507-144; e-mail: sebastian.ponce;victor.guerrero@epn.edu.ec)

---

**Resumen:** Actualmente un sinnúmero de polímeros biodegradables están siendo utilizados en la industria del empaquetamiento, el área médica, la fabricación de carcasas de artefactos electrónicos, entre otros. Sin embargo, estos polímeros normalmente no han incursionado en el diseño de elementos más complejos. Por lo tanto, en este estudio, se desarrolló diferentes materiales compuestos a base de un polímero biodegradable como el ácido poliláctico (PLA) reforzado con fibras naturales de abacá mediante moldeo por compresión. Como resultado del estudio se obtuvo mejoras de hasta un 165 y 130 % en la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, respectivamente. Además, un incremento del 50 y 100% en la resistencia a la flexión y su módulo, respecto a la matriz de PLA. Además, se dieron los primeros pasos para desarrollar métodos de fabricación utilizando estos materiales.

**Palabras clave:** polímeros, biodegradables, compuestos, PLA, abacá.

**Abstract:** Many biodegradable polymers are being used in package industry, medicine applications, cases for electronic devices and others, but they normally do not provide to the designer good mechanical properties in order to achieve better applications. Therefore, in this research, applying theories of the composites with natural fibers, a matrix of polylactic acid (PLA) has been combined with abaca natural fibers using compression molding. As a result, there was an increment of 165 and 135% in the tensile strength and Young Modulus. Moreover, an increment between 50 and 150% in flexural strength and Modulus compared of the polylactic acid matrix. Also, here are presented first steps in order to achieve manufacturing processes using these kind of materials.

**Keywords:** polymers, biodegradable, composites, PLA, abaca.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto parte de la necesidad de desarrollar una nueva rama de materiales que sean amigables con el ambiente y capaces de sustituir a los polímeros comunes. Para cumplir ese objetivo es necesario utilizar matrices biodegradables que presenten buenas propiedades mecánicas. Este estudio es parte del proyecto PIC-08-493 “Desarrollo de Nuevos Materiales para Aplicaciones Estructurales e Industriales” impulsado por el laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

En la última década la producción de polímeros biodegradables se ha incrementado significativamente. La producción actual de este tipo de polímeros se encuentra en alrededor de 214.400 toneladas por año mundiales, con un crecimiento anual en la producción del 18% aproximadamente. En los últimos 8 a 10 años se ha iniciado su producción a escala comercial, debido a que los polímeros

biodegradables han tenido aceptación en la fabricación de empaques de alimentos, bolsas, sacos, textiles, prótesis y otros. Además, existe un corriente en evolución en la cual grandes cadenas comerciales reconocen el valor de aplicar estrategias ecológicas centradas en lo “verde y sustentable”.

La utilización de polímeros biodegradables permite reducir el problema de recolección y almacenamiento de desechos, inconveniente grave que se puede apreciar en las grandes ciudades. Además, desde el punto de vista económico, gracias al impulso de grandes potencias como Alemania y por las continuas alzas del precio del crudo, se ha desarrollado tecnología que paulatinamente disminuye el costo de producir estos materiales, haciéndolos año tras año más competitivos.

A pesar de todas las ventajas que estos materiales presentan desde el punto de vista ecológico, su gran debilidad es la relativamente baja resistencia mecánica que poseen, lo cual es un impedimento para el desarrollo de más aplicaciones. Por ello, en este estudio se buscan materiales compuestos de una matriz polimérica reforzada con fibras naturales, las cuales mejoran las propiedades mecánicas del material sin afectar su reciclabilidad.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se obtuvieron tanto materiales de matriz polimérica biodegradable, como materiales compuestos de ésta 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.

Como matriz de los materiales compuestos biodegradables se utilizó PLA Ingeo 2002D producido por la empresa norteamericana NatureWorks LLC. En la Tabla 1, se presenta un resumen de las propiedades más importantes entregadas por el fabricante en su hoja técnica.

Tabla 1. Propiedades del PLA 2002D producido por NatureWorks LLC. [1]

Propiedades físicas	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,24
Índice de fluidez , g/10 min (210C/2,16 Kg)	5,00-7,00
Claridad	Transparente

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.

Tabla 2. Propiedades de la fibra de abacá de variedad Tangongón rojo. [2]

Propiedad	Valor
Finura	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

Para la elaboración de los materiales se definió dos estrategias metodológicas. La primera fue para la obtención de las láminas de PLA puro mediante moldeo por compresión. Esta metodología se muestra en la Figura 1. A continuación, y una vez definidos los parámetros de moldeo de las láminas de PLA, se procedió a definir 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. Esta metodología se presenta en la Figura 2.

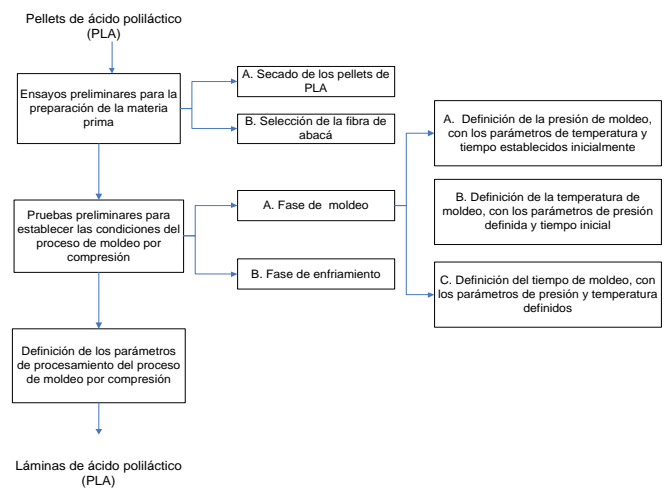


Figura 1. Estrategia metodológica para la obtención de láminas de PLA.

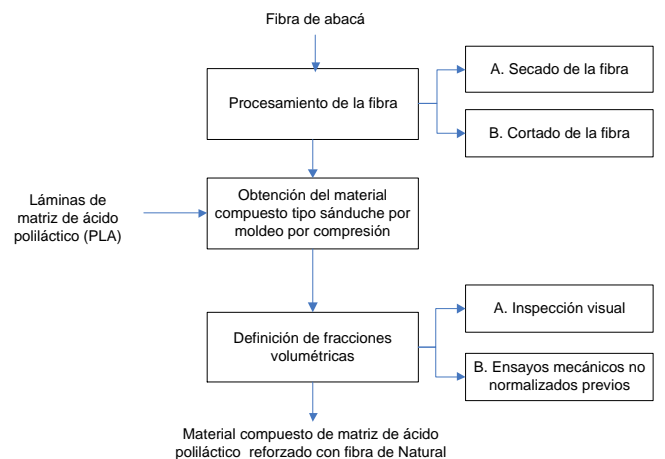





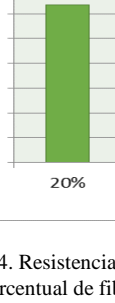
Figura 2. Estrategia metodológica para la elaboración de materiales compuestos.

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.

En la Tabla 3 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 homogénea de las fibras a lo largo de la geometría de la láminas, es decir que no existan espacios con fibra acumulada y otros sin refuerzo. De esta observación se obtuvo que el valor mínimo de adición de fibra es 0,13 y el valor máximo 0,20 en fracción volumétrica.

Tabla 3. Inspección visual para definir las fracciones máximas y mínimas de fibra a añadir en la matriz.

Fracción	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.	 Imagen aprox. 190 x 110 mm <sup>2</sup>
15%	Distribución uniforme de la fibra en la lámina.	 Imagen aprox. 190 x 100 mm <sup>2</sup>
13%	Se observaron fallas en los extremos de la placa, pero en general existió una muy buena distribución de la fibra.	 Imagen aprox. 150 x 100 mm <sup>2</sup>
10%	Hubo acumulación de la fibra en ciertas zonas; mientras que en otras no existía fibra que ocupara la matriz.	 Imagen aprox. 90 x 60 mm <sup>2</sup>

Para el caso de los ensayos no normalizados de tracción y flexión los resultados se grafican en la Figura 3 y la Figura 4. 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%.

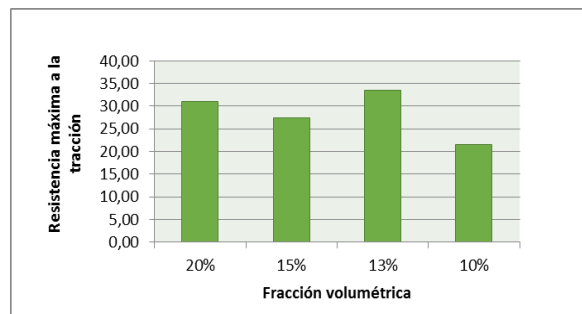


Figura 3. Resistencia a la tracción vs. fracción volumétrica porcentual de fibra de 10mm dispersada aleatoriamente.

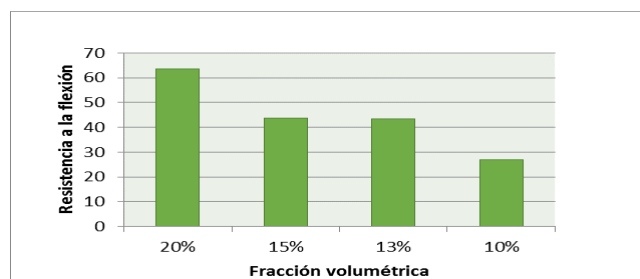


Figura 4. Resistencia máxima a la flexión vs. fracción volumétrica porcentual de fibra de 10 mm dispersada aleatoriamente.

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. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

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 (0,20 vol% y 0,13vol%, respectivamente). Como se muestra en la Tabla 4. Con estas láminas se fabricaron probetas de tracción, flexión e impacto para caracterizar a cada uno de los materiales, de acuerdo al procedimiento que se detalla a continuación:

- Se eliminaron residuos del procesamiento y se desecharon los extremos de la lámina que normalmente no presentaban un buen acabado.
- Se cortaron las probetas de acuerdo a la norma establecida mediante una sierra manual.
- Para el caso de las probetas de impacto se realizó un muescado.
- La probetas fueron lijadas en sus bordes con una lija número 400 para evitar fisuras o concentradores de esfuerzos.

En las Figs. 5, 6 y 7 se presentan la geometría de las probetas de acuerdo a la norma aplicada. Por cada ensayo el número de probetas fabricadas fue de siete.

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPUESTOS BIODEGRADABLES ELABORADOS A BASE DE ÁCIDO POLILÁCTICO REFORZADOS CON FIBRAS DE ABACÁ**

Tabla 4. Materiales elaborados para la caracterización mecánica.

Láminas elaboradas (Denominación)	Orientación de la fibra	Adición de fibra (Porcentaje en volumen)
PLA puro	-	0
Compuesto de fibra corta 10 mm (13vol%)	Dispersa-10 mm	13
Compuesto de fibra corta de 10 mm (20 vol%)	Dispersa-10 mm	20
Compuesto de fibra continua (13vol%)	Continua orientada longitudinalmente (0°)	13
Compuesto de fibra continua (20 vol%)	Continua orientada longitudinalmente (0°)	20

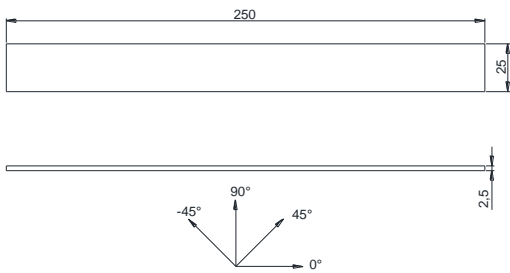


Figura 5. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción, según norma ASTM D 3039-08.

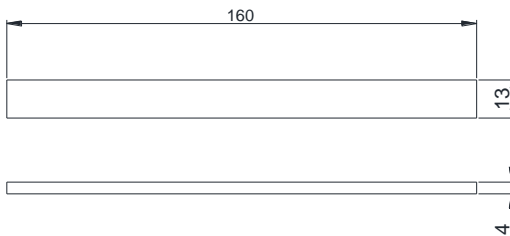


Figura 6. Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión, según la norma ASTM D 7264/ -07.

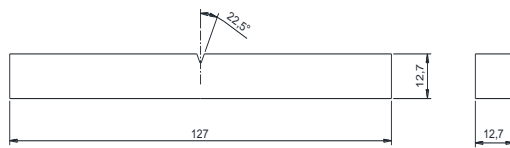


Figura 7. Dimensiones de la probeta para determinar la resistencia al impacto, según la norma ASTM D 256-10.

**4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este punto se realizó un análisis de los resultados obtenidos después de llevada a cabo la estrategia metodológica para la selección de los parámetros de moldeo más eficaces, como también de los resultados de la caracterización mecánica de las probetas normalizadas elaboradas con los materiales. Inicialmente en la tablas 5 y 6 se muestran los valores de presión, tiempo y temperatura que deben ser aplicados para obtener láminas de PLA y de

material compuesto con un mínimo de fallas. Cabe recalcar que los valores de temperatura son los fijados en el control de temperatura de la Prensa Carver modelo 4128, que se encuentra en el laboratorio de Nuevos Materiales de la EPN. Además en la Figura 8 se presentan los tipos de láminas obtenidas en el estudio.

Tabla 5. Presiones, tiempos y temperaturas fijadas a lo largo del moldeo de PLA.

Material	Espesor de lámina (mm)	Tiempo aprox. (s)	Presión constante aplicada (psi)	Temperatura (°F)	
				Ts	Ti
(PLA)	2,50	600	6.000	345	340
	4	720	6.000	345	340
	> 6,35	780	6.000	345	340

Tabla 6. Presiones, tiempos y temperaturas fijadas a lo largo del moldeo de materiales compuestos.

Material	Espesor de lámina (mm)	Tiempo aproximado (s)	Presión constante aplicada (psi)	Temperatura (°F)	
				Ts	Ti
Materiales compuestos	2,50	720	3.000	345	340
	4	840	3.000	345	340
	> 6,35	960	3.000	345	340

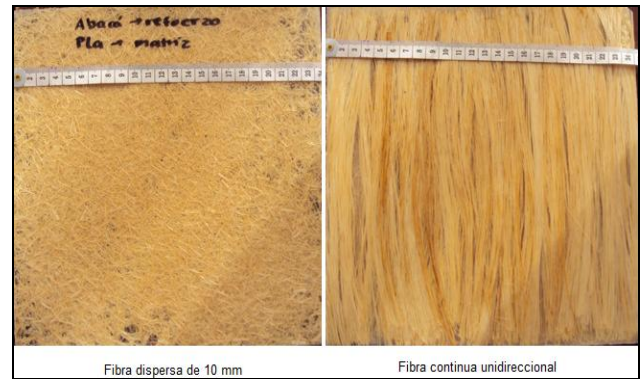


Figura 8. Láminas de material compuesto de matriz de PLA reforzada con fibra natural (Dimensiones de las láminas 239 x 239 mm).

A continuación, se presentan los resultados alcanzados para cada uno de los ensayos mecánicos realizados en el proyecto.

4.1 Ensayo de Tracción

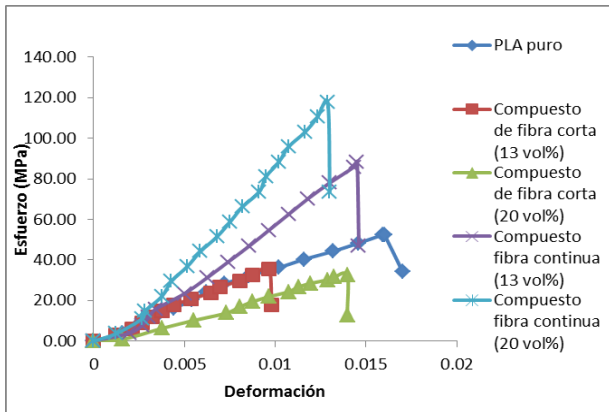


Figura 9. Curvas esfuerzo vs. Deformación (m/m) de los materiales compuestos elaborados y de la matriz de PLA.

De acuerdo con lo observado en la Figura 9, 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 media entre la matriz y los refuerzos de fibra. Ya que en general el refuerzo si permitió el mejoramientos de la propiedades. Asimismo, se calculó que la eficiencia del refuerzo en la matriz no supera el 62%.

Además, en la Figura 10 se presenta el diagrama resistencia máxima vs. módulo de elasticidad para mostrar el comportamiento de los materiales ensayados frente a otros polímeros comunes de la industria. Se observa claramente que la mejor configuración alcanzada es la de fibra continua unidireccional con fracción volumétrica de fibra de 0,20. Mientras que la matriz pura de PLA tiene propiedades comparables al PET, polietileno de alta densidad y poliestireno.

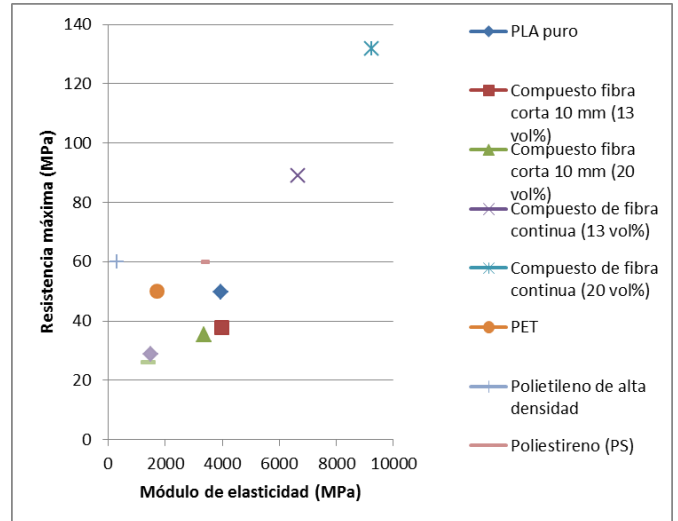


Figura 10. Diagrama resistencia máxima vs. módulo de elasticidad de los materiales compuestos elaborados, la matriz de PLA y otros polímeros comunes en la industria.

En la Figura 11 se muestra un ejemplo de la fractura producida sobre los materiales ensayados a tracción. Estas fracturas en su totalidad empezaron en la matriz de PLA por ser el componente frágil compuesto.

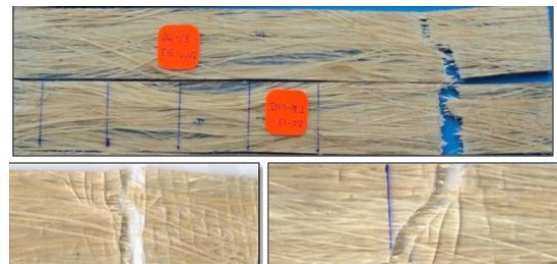


Figura 11. Probetas de material compuesto de fibra continua unidireccional al 13 vol% ensayadas.

4.2 Ensayo de Flexión

En la Figura 12 se muestran las curvas típicas esfuerzo vs. deformación tanto de la matriz y los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá.

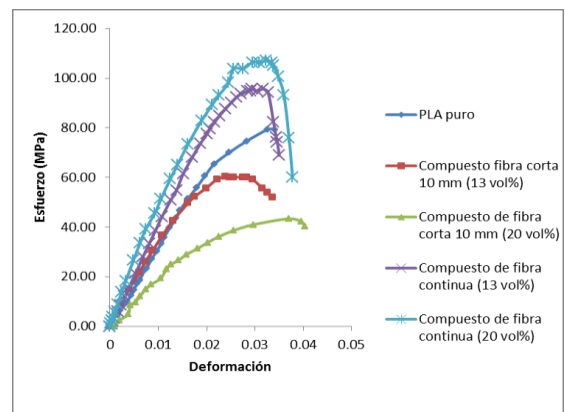


Figura 12. Curvas esfuerzo vs. Deformación (m/m) a la flexión de materiales compuestos de fibra de abacá y matriz de PLA.

De acuerdo con lo observado en Figura 12, 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 el ensayo de tracción, las fallas se produjeron en la matriz de PLA dejando las fibras sin daño alguno. Sin embargo, nuevamente estas si fueron importantes para a mejora de las propiedades. 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 13 se presenta ejemplos de estos comportamientos. Además, en la Figura 14 se presenta el diagrama resistencia máxima vs. módulo de elasticidad para mostrar el comportamiento de los materiales ensayados. En esta gráfica, al igual que en el ensayo de tracción, el material reforzado con fibra continua unidireccional de fracción volumétrica de fibra de 0,20 es aquel que presenta las mejores características a flexión.



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



(b) Fractura incompleta de las probetas de material compuesto.

Figura 13. Fallas ejemplos de (a) matriz de PLA, (b) probetas de fibra corta de 10 mm al 13 %vol, y fibra continua unidireccional al 13 %vol.

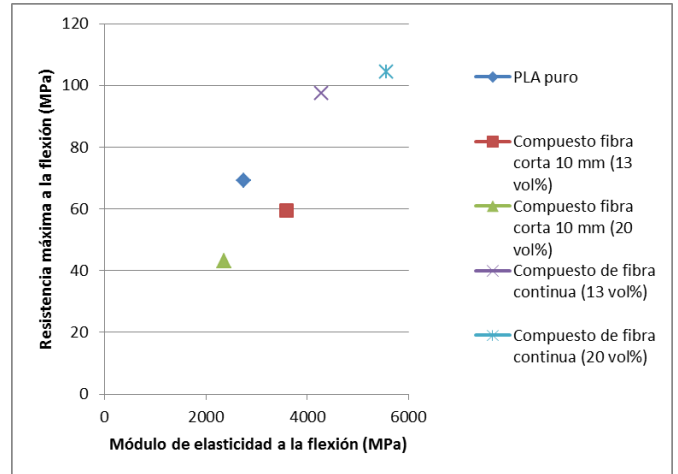


Figura 14. Diagrama resistencia máxima a la flexión vs. módulo de elasticidad a la flexión de los materiales compuestos elaborados y la matriz de PLA.

### 4.3 Ensayo de 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 se evidenciaba una falta de adherencia entre la matriz y las fibras. 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.

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 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. Ejemplos de las fracturas se presentan en la Figura 15.

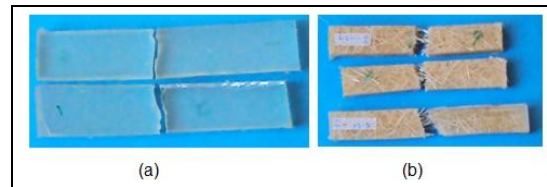


Figura 15. (a) matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%.

Tabla 7. 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)	
Matriz PLA	0	196,94	...
Compuesto de fibra corta de 10 mm	13	196,48	No sufre variaciones significativas
Compuesto de fibra corta de 10 mm	20	500,22	Aumento del 150
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	13	637,1	Aumento del 200
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	20	711,57	Aumento del 200

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 sufrían 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. Ejemplos de la fracturas se presentan en la Figura 16.



Figura 16. (a) Matriz de PLA, (b) fibra corta de 10 mm al 13 vol%.

Tabla 8. 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	...
Compuesto de fibra corta de 10 mm	13	167,23	Aumento del 400 %
Compuesto de fibra corta de 10 mm	20	492,31	Aumento mayor al 1.000 %
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	13	625,50	
Compuesto de fibra continua orientada longitudinalmente	20	700,10	

## 5. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

En este apartado se describe el prototipo elaborado en el estudio. Este prototipo buscaba conocer las facilidades que presenta el procesamiento tanto de la matriz como de los compuestos. Inicialmente, se ejecutó un análisis funcional de la matriz del material, lo cual permitió reconocer las fortalezas y debilidades de la misma (Tabla 9).

Seguidamente, se plantearon diferentes opciones del producto a realizarse, tomando en cuenta las aplicaciones actuales del PLA (Tabla 10). Posteriormente, se compararon las diferentes alternativas mediante el método ordinal de criterios ponderados, hasta obtener el producto más adecuado (Tabla 11). De este análisis se concluyó que el prototipo a ser fabricado debía ser una bandeja para empaquetamiento de productos, a partir de matriz de PLA y de material compuesto reforzado de fibra corta de 10 mm debido a su facilidad de elaboración.

El producto fue fabricado mediante termoformado de láminas en un molde de acero ASTM A-36 tipo macho-hembra, el mismo que se muestra en la Figura 17.

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPUESTOS BIODEGRADABLES ELABORADOS A BASE DE ÁCIDO POLILÁCTICO REFORZADOS CON FIBRAS DE ABACÁ**

Tabla 9. Valoración de las características de la matriz de acuerdo al análisis funcional.

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

Tabla 10. Alternativas propuestas para la elaboración del prototipo.


Alternativa	Descripción	Producto
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.	
A3	Cacerola para mantener comida guardada.	

Tabla 11. Resultados del método de comparación de alternativas.

Alt.	Costo	Conformación	Resistencia	Vida útil	Ambiente	Aplicación Ecológica	S	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

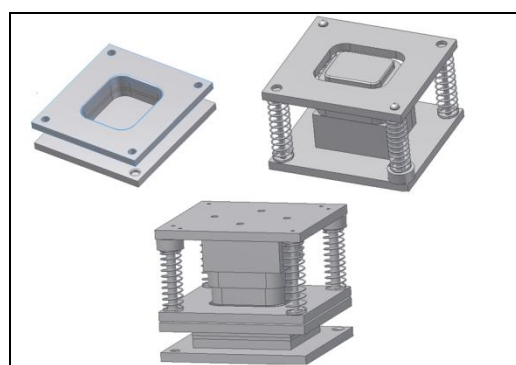


Figura 17. Molde de acero ASTM A-36 para termoformado.

En la Tabla 12 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.

Tabla 12. Tabla de temperaturas y tiempos de calentamiento de las láminas a ser termoformadas.

Material	Espesor	Temperatura de termoformado (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
	(mm)		
PLA	1	60 - 85	90
	1,5		
	2		
Material Compuesto	1,5	80 - 90	170
	2		210
	2,5		

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, esto se muestra en la Figura 18.

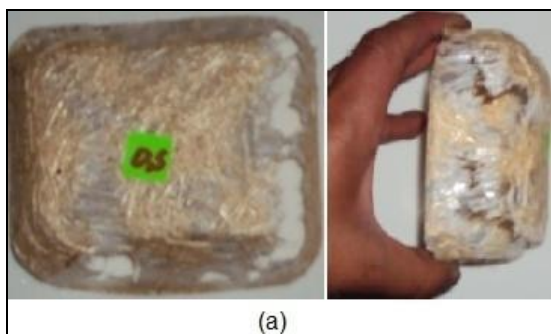


Figura 18. Bandejas resquebrajadas en los cambios bruscos de geometría.

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 19.



Figura 19. Bandeja unida al resto de la lámina de material compuesto.

Además, 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 20. A diferencia de los prototipos a base de PLA en los materiales compuestos el mínimo espesor a termoformar es de 1,5 mm (

Figura 21); 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.



Figura 20. Prototipos de PLA elaborados con láminas de 0,5; 1,0; 1,5 y 2,0 mm.

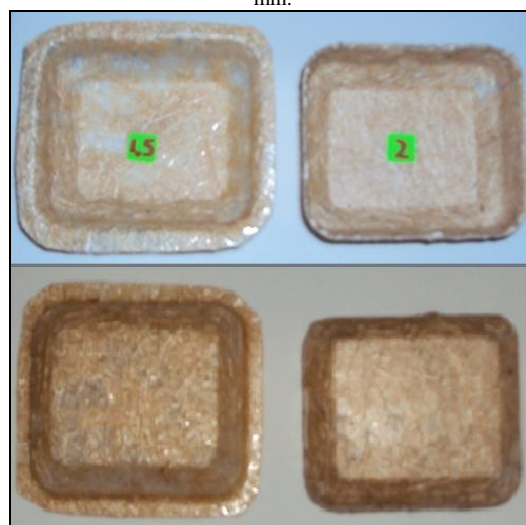


Figura 21. Prototipos elaborados a base de material compuesto reforzado con fibra dispersa de 10 mm al 0,13 de fracción volumétrica. Espesores 1,5 y 2,0 mm.

En cuanto al costo de fabricación, las bandejas de material compuesto fueron aquellas que presentaron los más altos valores. En la Tabla 13 se muestra el costo final para la elaboración de una bandeja de matriz de PLA, material compuesto y de otro plástico comercial (polipropileno), tomando en cuenta el mismo procesamiento.

Tabla 13. 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 13, 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 se 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 19), 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.

Finalmente, hay que tomar en cuenta que mejorando el procesamiento se podría elaborar productos que tomen ventaja del mejoramiento en las propiedades mecánicas.

## 6. CONCLUSIONES

Como resultado de las pruebas preliminares se entrega un procedimiento con parámetros (temperaturas, presiones y tiempos) reproducibles para la obtención de láminas de matriz pura y materiales compuestos con la menor cantidad de fallas internas y superficiales.

### 6.1 Tracción

La formulación de material compuesto de abacá-PLA 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 PLA 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).

### 5.2 Flexión

La formulación de material compuesto de abacá-PLA 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 PLA en aproximadamente el 50 % en la resistencia máxima a la flexión (104,4 MPa) y 100 % en el módulo de elasticidad (5.570 MPa).

### 5.3 Impacto

En cuanto a la resistencia al impacto los materiales compuestos aumentaron significativamente respecto a la matriz de PLA. 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 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.

De estos resultados se puede concluir que el material compuesto elaborado con las mejores características mecánicas cumple con los objetivos del estudio. Ya que se entrega un material capaz de utilizarse en la sustitución de los plásticos comunes y además se lo puede utilizar en diseños donde existan mayores requerimientos de resistencia mecánica.

La elaboración de productos a base de PLA y sus compuestos presentan dificultades en el ingreso a la palestra de productos comerciales, debido a su dificultad en el moldeo, costos y técnicas de procesamiento. Sin embargo, el estudio cumple con el objetivo de mostrar en buena medida estas problemáticas con la finalidad de incentivar el estudio de

estos materiales enfocándose en el mejoramiento de los métodos de producción a baja, mediana y gran escala.

## 6. REFERENCIAS

C. Bastioli, C; *Handbook of Biodegradable Polymers*; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2005.

L. Lim ; R. Auras; *Processing technologies for poly(lactic acid)*; University of Guelph-Canadá; Elsevier , 2008.

A. Mohanty; M. Misra; L. Drzal; *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*; Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.

P. Montero; I. Naranjo; *Plásticos reforzados con fibra de abacá*; Proyecto de titulación; Ingeniería Mecánica; Escuela Politécnica Nacional; Diciembre-1988.

D. Platt; *Biodegradable Polymers*; Rapra Technology Limited; United Kingdom; 2006.

A. Salas; *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. Tamayo; *Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras de cabuya*; Laboratorio de Nuevos Materiales; Escuela Politécnica Nacional; Quito, Noviembre; 2011.