

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO REFORZADO CON FIBRA DE CABUYA Y CON RAQUIS DE PALMA AFRICANA

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

EDWIN ANDRÉS PROAÑO FIALLOS
(andresproanof@gmail.com)

DIRECTOR: ING. MIGUEL ALDÁS
(miguel.aldas@epn.edu.ec)

Quito, julio 2015

© Escuela Politécnica Nacional (2015)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Andrés Proaño, declaro que el trabajo aquí descrito es de nuestra 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.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Andrés Proaño

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Proaño, bajo mi supervisión.

Ing. Miguel Aldás
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por permitirme alcanzar este logro, ya que sin su esfuerzo y sacrificio nada esto sería posible. A mi hermana Monse por su apoyo y amor incondicional. Ustedes son mi pilar fundamental en todo lo que he sido, soy y seré. Les amo con mi vida.

A mi familia, a mis abuelitos que siempre me han brindado su apoyo y cariño, quienes han sabido guiar mis pasos y quienes son partícipes de esta meta lograda, esto también es de ustedes, Tito gracias por todo y estar todavía acompañándome. A mis tías y tíos, mi familia de Quito, quienes han sido mis padres y hermanos en mi vida universitaria: Wilmi, Blanqui, María, Marito, Mauri y Carlita. Muchísimas gracias por todo el amor recibido, el cual es totalmente correspondido.

A Diana, quién me ha apoyado en todos estos años. Adoro tu locura y la capacidad que tienes para hacerme reír. Eres única, gracias totales.

A Miguel Aldás, quien ha sido una persona fundamental en la realización de este proyecto, quien además de dirigir esta tesis me ha brindado su amistad, gracias por la ayuda brindada, los consejos y la experiencia aportada, sin duda tu aporte fue esencial. A las personas quienes conforman el CIAP: Juan, Iván, Liz, Vlady. Al Ing. Quiroz e Ing. Bonilla por su colaboración al desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, los del colegio con quienes he compartido demasiadas experiencias y con quienes seguiré viviendo muchas cosas más, gracias por su más sincera amistad. A Stuart, ratón gracias por todo, eres ese hermano que nunca tuve, considera esto como si fuera un logro tuyo también. A los de la poli, mis panas y colegas, gracias por la amistad brindada. Los del pio, amiciaps y los pigs: Andre, Anita, Calucón, Chilly, Chino, Cusu, Herman, Lucho, Micke, Navas, Nelo, Pao, Pelón, Tiang, Yessy (nombrados alfabéticamente).

DEDICATORIA

A mis padres Patricio y Janeth, a mi hermana Monse y a mis abuelitos, a quienes les debo todo lo que ahora soy. Los amo infinitamente

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xviii
INTRODUCCIÓN	xx
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Poliuretano	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.1.2. Generalidades	1
1.1.3. Proceso de reacción de la espuma rígida de poliuretano	3
1.1.4. Proceso para la producción de espuma rígida de poliuretano	5
1.1.4.1. Método de mezclado manual	5
1.1.4.2. Método de mezclado con máquinas	5
1.1.4.3. Producción de tableros y paneles con revestimientos de espuma rígida de poliuretano	7
1.1.4.4. Producción in-situ de espuma rígida de poliuretano	7
1.1.5. Aplicaciones del poliuretano rígido	8
1.2. Fibras naturales	8
1.2.1. Fibra de raquis de palma africana	10
1.2.2. Fibra de cabuya	11
1.2.3. Tratamientos químicos aplicados a las fibras	13
1.3. Materiales compuestos	14
1.3.1. Materiales compuestos de espuma rígida de poliuretano	17
1.3.2. Métodos de caracterización de materiales compuestos	18
1.3.2.1. Propiedades mecánicas	18
1.3.2.2. Análisis de flamabilidad	22
1.3.2.3. Análisis de las propiedades térmicas	23
1.3.2.4. Análisis de las propiedades acústicas	26
2. PARTE EXPERIMENTAL	30
2.1. Formulación de materiales compuestos de poliuretano con fibra de cabuya con y sin modificación química de la fibra	30
2.1.1. Preparación física de la fibra de cabuya	30
2.1.2. Preparación química de la fibra de cabuya	32
2.2. Formulación de materiales compuestos de poliuretano con fibra de raquis de palma africana con y sin modificación química de la fibra	33
2.2.1. Preparación física de la fibra de raquis de palma africana	33

2.2.2.	Preparación química de la fibra de raquis de palma africana	33
2.2.3.	Selección de las condiciones óptimas de procesamiento del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con raquis de palma africana	34
2.2.4.	Preparación del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con raquis de palma africana	34
2.3.	Caracterización de los materiales compuestos	36
2.3.1.	Evaluación de las propiedades mecánicas	36
2.3.1.1.	Ensayo de flexión	37
2.3.1.2.	Ensayo de tracción	38
2.3.1.3.	Selección de los materiales compuestos	38
2.3.2.	Determinación de la densidad y flamabilidad	39
2.3.2.1.	Ensayo de densidad	39
2.3.2.2.	Ensayo de flamabilidad	39
2.3.3.	Análisis de propiedades térmicas y acústicas	40
2.3.3.1.	Análisis de las propiedades térmicas	40
2.3.3.2.	Análisis de las propiedades acústicas	41
2.3.3.3.	Análisis de costos de producción de un material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya y con raquis de palma africana	42
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1.	Formulación de materiales compuestos de poliuretano con fibra de cabuya con y sin modificación química de la fibra	45
3.1.1.	Resultados de la preparación física de la fibra de cabuya	45
3.1.2.	Resultados de la preparación química de la fibra de cabuya	46
3.2.	Formulación de materiales compuestos de poliuretano con fibra de raquis de palma africana con y sin modificación química de la fibra	46
3.2.1	Resultados de la preparación física de la fibra de raquis de palma africana	46
3.2.2.	Resultados de la preparación química de la fibra de raquis de palma africana	47
3.2.3.	Selección de las condiciones óptimas de procesamiento del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con raquis de palma africana	47
3.2.4.	Preparación del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con raquis de palma africana	52

3.3.	Caracterización de los materiales compuestos	55
3.3.1.	Evaluación de las propiedades mecánicas	55
3.3.1.1.	Ensayo de flexión	55
3.3.1.2.	Ensayo de tracción	71
3.3.1.3.	Selección de los materiales compuestos	83
3.3.2.	Determinación de la densidad y flamabilidad	85
3.3.2.1.	Ensayo de densidad	85
3.3.2.2.	Ensayo de flamabilidad	87
3.3.3.	Análisis de propiedades térmicas y acústicas	89
3.3.3.1.	Análisis de las propiedades térmicas	89
3.3.3.2.	Análisis de las propiedades acústicas	92
3.3.3.3.	Resultados del análisis de costos de producción de un material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya y con raquis de palma africana	95
4.	CONCLUIONES Y RECOMENDACIONES	99
4.1.	Conclusiones	99
4.2.	Recomendaciones	101
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Composición química de las fibras naturales	9
Tabla 1.2.	Propiedades mecánicas de la fibra de raquis de palma africana y de la cabuya	12
Tabla 1.3.	Ventajas y desventajas del uso de fibras naturales en materiales compuestos	16
Tabla 2.1.	Variables y niveles para el desarrollo del material compuesto de matriz de poliuretano rígido	36
Tabla 2.2.	Condiciones de trabajo para los ensayos de flexión	37
Tabla 2.3.	Condiciones de trabajo para los ensayos de tracción	38
Tabla 2.4.	Condiciones de trabajo para el ensayo de flamabilidad	39
Tabla 2.5.	Condiciones de trabajo para determinar el coeficiente de conductividad térmica	40
Tabla 2.6.	Dimensiones de la cabina de confinamiento	42
Tabla 3.1.	Resultados obtenidos de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	56
Tabla 3.2.	Resultados obtenidos de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	62
Tabla 3.3.	Resultados obtenidos de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	71
Tabla 3.4.	Resultados obtenidos de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	76
Tabla 3.5.	Resultados obtenidos para el ensayo de densidad para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	86
Tabla 3.6.	Resultados obtenidos para el ensayo de flamabilidad para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	88

Tabla 3.7.	Resultados obtenidos del coeficiente de conductividad térmica (k) para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	80
Tabla 3.8.	Pérdidas por transmisión (dB) medida para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	93
Tabla 3.9.	Costos de materia prima para la producción del material de poliuretano rígido	96
Tabla 3.10.	Costos de materia prima para la producción del material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra natural	96
Tabla 3.11.	Costos de preparación de la fibra de raquis de palma africana	97
Tabla 3.12.	Costos de preparación de la fibra de cabuya	97
Tabla 3.13.	Costos de producción del material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra natural	97
Tabla AI. 1.	Resultados del ensayo de flexión del material de poliuretano	112
Tabla AI. 2.	Resultados del ensayo de flexión del material de poliuretano	112
Tabla AI. 3.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 5% en peso	113
Tabla AI. 4.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 10% en peso	113
Tabla AI. 5.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 10% en peso	114
Tabla AI. 6.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso	114
Tabla AI. 7.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso	115
Tabla AI. 8.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya al 5% en peso	115

Tabla AI. 9.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 5% en peso	116
Tabla AI. 10.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya al 10% en peso	116
Tabla AI. 11.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 10% en peso	117
Tabla AI. 12.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso	117
Tabla AI. 13.	Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso	118
Tabla AIII. 1.	Valor-p para los parámetros del ensayo de flexión del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra natural	131
Tabla AIII. 2.	Valor-p para los parámetros del ensayo de tracción del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra natural	132
Tabla AIV. 1.	Resultados del ensayo de tracción del material de poliuretano	133
Tabla AIV. 2.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 5% en peso	133
Tabla AIV. 3.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 5% en peso	134
Tabla AIV. 4.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 10% en peso	134
Tabla AIV. 5.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 10% en peso	135
Tabla AIV. 6.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso	135

Tabla AIV. 7.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso	136
Tabla AIV. 8.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya al 5% en peso	136
Tabla AIV. 9.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 5% en peso	137
Tabla AIV. 10.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya al 10% en peso	137
Tabla AIV. 11.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 10% en peso	138
Tabla AIV. 12.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso	138
Tabla AIV. 13.	Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso	139
Tabla AV. 1.	Medidas de las dimensiones del molde utilizado para la elaboración del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibras naturales	140
Tabla AV. 2.	Resultados del peso del material de poliuretano	140
Tabla AV. 3.	Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso	141
Tabla AV. 4.	Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso	141
Tabla AV. 5.	Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso	141
Tabla AV. 6.	Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratada al 15% en peso	142
Tabla AVI. 1.	Resultados del ensayo de flamabilidad para material de poliuretano	144

Tabla AVI. 2.	Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso	144
Tabla AVI. 3.	Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratada al 15% en peso	145
Tabla AVI. 4.	Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso	145
Tabla AVI. 5.	Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratada al 15% en peso	146
Tabla AVII. 1.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Primera repetición	147
Tabla AVII. 2.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Segunda repetición	149
Tabla AVII. 3.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Tercera repetición	151
Tabla AVII. 4.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Primera repetición	153
Tabla AVII. 5.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Segunda repetición	154
Tabla AVII. 6.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Tercera repetición	157
Tabla AVII. 7.	Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición	159

Tabla AVII. 8. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición	161
Tabla AVII. 9. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Tercera repetición	163
Tabla AVII. 10. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Primera repetición	164
Tabla AVII. 11. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Segunda repetición	166
Tabla AVII. 12. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Tercera repetición	168
Tabla AVII. 13. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición	170
Tabla AVII. 14. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición	171
Tabla AVII. 15. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Tercera repetición	174
Tabla AVII. 16. Parámetros usados para el cálculo del coeficiente de conductividad térmica	175
Tabla AVIII. 1. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (db) en bandas de octava para la fuente de ruido sin confinamiento	178
Tabla AVIII. 2. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (db) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material de poliuretano	179

Tabla AVIII. 3. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (db) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso	179
Tabla AVIII. 4. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (db) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso	180
Tabla AVIII. 5. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (db) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso	180
Tabla AVIII. 6. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (db) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso	181
Tabla AVIII. 7. Resultados obtenidos de la masa por unidad de superficie de los materiales compuestos	182
Tabla AVIII. 8. Pérdidas por transmisión (dB) calculados con base en las propiedades físicas del material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	183
Tabla AX. 1. Consumo energético requerido para la preparación de fibra	186

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Reacción del poliuretano	4
Figura 1.2.	Esquema del proceso de la fabricación del poliuretano	6
Figura 1.3.	a) Planta de palma africana y b) Racimo de fruta de palma africana	10
Figura 1.4.	Planta de cabuya	12
Figura 1.5.	Esquema de la reacción de acetilación	14
Figura 1.6.	Fuerzas de compresión, tracción, corte y flexión	18
Figura 1.7.	Curva esfuerzo-deformación típica para los polímeros	20
Figura 1.8.	Esquema de la configuración del equipo	24
Figura 1.9.	Flujo de calor disipado por el sistema de placas	25
Figura 1.10.	Frecuencia, período y longitud de onda de un sonido	27
Figura 1.11.	Transmisión del sonido entre dos habitaciones divididas por una pantalla aislante	28
Figura 2.1.	a) Fibra de raquis de palma africana, b) Fibra de cabuya	31
Figura 2.2.	a) Proceso de acetilación, b) Baño de aceite	32
Figura 2.3.	a) Accesorios para ensayo de flexión, b) Accesorios para ensayo de tracción	37
Figura 2.4.	a) Fuente de ruido y b) Esquema de confinamiento	42
Figura 3.1.	Material compuesto formulado con diferentes temperaturas de molde a) 40°C, b) 50°C y c) 60°C	50
Figura 3.2.	Fallas debido a los diferentes tiempos de moldeo a) y b) Falta de estabilidad dimensional, c) Porosidad en el acabado superficial	51
Figura 3.3.	Plancha de material compuesto con 20% de carga en peso de fibra	52
Figura 3.4.	Problemas en el material compuesto cuya carga era del 15% de fibra	53

Figura 3.5.	Deformación en el punto de fluencia obtenida de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	57
Figura 3.6.	Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	58
Figura 3.7.	Módulo de flexión obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	60
Figura 3.8.	Deformación en el punto de fluencia obtenida de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	63
Figura 3.9.	Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	65
Figura 3.10.	Módulo de flexión obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	66
Figura 3.11.	Deformación en el punto de fluencia obtenida de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con fibra de raquis de palma africana	68
Figura 3.12.	Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con fibra de raquis de palma africana	69
Figura 3.13.	Módulo de flexión obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	70
Figura 3.14.	Deformación al pico obtenida de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	72
Figura 3.15.	Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	74
Figura 3.16.	Módulo de young obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana	75
Figura 3.17.	Deformación al pico obtenida de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	77

Figura 3.18.	Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	79
Figura 3.19.	Módulo de young obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya	80
Figura 3.20.	Deformación al pico obtenida de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y raquis de palma africana	81
Figura 3.21.	Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y raquis de palma africana	82
Figura 3.22.	Módulo de young obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y raquis de palma africana	83
Figura 3.23.	Densidad de los materiales compuestos de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	86
Figura 3.24.	Velocidad de combustión de los materiales compuestos de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	89
Figura 3.25.	Coefficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	91
Figura 3.26.	Pérdidas por transmisión medidas (dB) para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales	94
Figura 3.27.	Pérdidas por transmisión (dB) para el material compuesto con cabuya acetilada y material aglomerado de madera	95
Figura AII.1.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de deformación del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico	119
Figura AII.2.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de deformación el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra	119
Figura AII.3.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico	120

Figura AII.4.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra	120
Figura AII.5.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico	121
Figura AII.6.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo en el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra	121
Figura AII.7.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico	122
Figura AII.8.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra	122
Figura AII.9.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico	123
Figura AII.10.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra	123
Figura AII.11.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico	124
Figura AII.12.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo en el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra	124
Figura AII.13.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de deformación del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico	125
Figura AII.14.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de deformación el ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra	125

Figura AII.15.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico	126
Figura AII.16.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra	126
Figura AII.17.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo del ensayo de f tracción cuya variable es el tratamiento químico	127
Figura AII.18.	Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo en el ensayo de f tracción cuya variable es la concentración de la fibra	127
Figura AII.19.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico	128
Figura AII.20.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación el ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra	128
Figura AII.21.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico	129
Figura AII.22.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra	129
Figura AII.23.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico	130
Figura AII.24.	Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo en el ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra	130
Figura AVII.1.	Gráfica de medianas para el coeficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos con la variable de tratamiento químico	176

- Figura AVII.2.** Gráfica de medianas para el coeficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos con la variable de tipo de material 177
- Figura AIX.1.** Pérdidas por transmisión típicas de distintos materiales 184

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I	
Resultados de los ensayos de flexión	112
ANEXO III	
Análisis de gráficos de medianas – Statgraphics	119
ANEXO III	
Análisis anova – Statgraphics	131
ANEXO IV	
Resultados de los ensayos de tracción	133
ANEXO V	
Resultados del ensayo de densidad	140
ANEXO VI	
Resultados del ensayo de flamabilidad	143
ANEXO VII	
Ensayo de conductividad térmica	147
ANEXO VIII	
Análisis de las propiedades acústicas	178
ANEXO IX	
Pérdidas por transmisión de distintos materiales	184
ANEXO X	
Cálculos para el análisis de costos	185

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo el desarrollo de dos tipos de materiales compuesto de matriz de poliuretano rígido, el primer material compuesto formulado con fibra de cabuya y el segundo material compuesto formulado con fibra de raquis de palma africana. Se busca la disminución de costos de producción mediante la incorporación de la fibra en la elaboración de poliuretano rígido.

La fibra de raquis de palma africana fue recolectada de una planta extractora de aceite en la provincia de Los Ríos y la fibra de cabuya fue adquirida en la provincia de Imbabura. Se separaron impurezas de las fibras, luego las fibras fueron molidas y tamizadas. Se usaron fibras cuyo tamaño de partícula sea menor a 250 μm . Por último, las fibras fueron sometidas a un proceso de secado a 105°C por 4 horas. Para mejorar la afinidad matriz-fibra las fibras fueron sometidas a un proceso de acetilación con anhídrido acético en un baño de aceite a 110°C con un reflujo condensador durante 120 minutos.

Se elaboraron materiales compuestos con concentraciones de carga en peso de fibra de: 5%, 10% y 15%. Como materia prima del poliuretano se utilizó: difenilmetano diisocianato y polioliol polioxipropilénico, fabricados por la empresa Huntsman. Se determinó que la relación más adecuada en peso polioliol:isocianato es igual a 1:1,1. Las paredes internas del molde debieron estar a 50°C, con un tiempo de moldeo de 15 minutos.

Se realizaron ensayos de flexión a los materiales compuestos desarrollados. El material formulado con 10% en peso de fibra presentó las más altas propiedades mecánicas en dicho ensayo (resistencia a la flexión y módulo de flexión). Además, se realizaron ensayos de tracción, donde el material compuesto formulado con 5% en peso de fibra presentó las mayores propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y módulo de Young). En ambos ensayos mecánicos el material formulado con fibra acetilada presentó resultados ligeramente mayores en relación con el material formulado con fibra sin tratamiento químico. Se seleccionaron los

materiales con 15% en peso de fibra debido a que las propiedades mecánicas son iguales o superiores a las del material hecho sólo de poliuretano.

Se determinó la densidad y la velocidad de combustión de los materiales seleccionados (materiales compuestos con 15% de fibra). La densidad de los materiales compuestos aumentó en un 50% y la velocidad de combustión aumentó hasta un 60% en comparación con el material de poliuretano.

Además se realizaron ensayos para determinar las propiedades acústicas y térmicas de los materiales seleccionados (materiales compuestos con 15% de fibra). Los coeficientes de conductividad térmica de los materiales compuestos presentaron una variación menor al 10% con respecto al del poliuretano. El material compuesto no presentó propiedades adecuadas para su uso como aislante acústico.

El costo de producción del material compuesto con fibra de raquis de palma africana disminuyó en un 16% en comparación con el costo de producción del material hecho sólo de poliuretano, mientras que el costo de producción del material compuesto con fibra de cabuya presentó una disminución del 14,5%.

INTRODUCCIÓN

Desde las pasadas décadas, las fibras naturales han atraído el interés de investigadores e industrias debido a sus ventajas específicas en comparación con las fibras sintéticas (tales como: resistencia al impacto, tracción, desgaste y fatiga). La creciente preocupación mundial sobre el medio ambiente está alentando el uso de materiales de fuente renovable que no dañan la naturaleza y provienen de una fuente alterna de buen potencial económico. En los últimos años las fibras naturales han sido utilizadas para el refuerzo de matrices termoplásticas y termoestables (Barra, Fredel, Al-Qureshi, Taylor y Clemenceau, 2006, p. 582).

Uno de los problemas ambientales que existe es el poco uso que se les da a los residuos agroindustriales lignocelulósicos como el tamo de arroz, residuos de cosechas de cereales, bagazo de caña de azúcar, aserrín, raquis de palma africana, subproductos del desfibrado de plantas como la cabuya, abacá, entre otros. Todos estos residuos en su mayoría son incinerados y devueltos al campo como fertilizante. Estos materiales pueden ser una fuente alternativa de materia prima para crear bienes con valor agregado (Hassan, Salema, Ani y Bakar, 2010, p. 2080).

La fibra de raquis de palma africana es un residuo lignocelulósico que se obtiene como desecho de la extracción de aceite de palma africana. La fibra de raquis de palma africana se la utiliza como abono y alimento para los animales, generación de energía, en la fabricación de pulpa y papel, como relleno en tableros de madera y como refuerzo de hormigón armado (Mejía, 2012, p. 11). Por otro lado, la fibra de cabuya es obtenida de la planta del mismo nombre que se encuentra a lo largo del callejón interandino que crece en forma silvestre o cultivada. La fibra de cabuya se utiliza para la confección de artículos artesanales, tapetes, alfombras, hilos, cuerdas, costales, también se lo usa como sustituto para la fibra de vidrio y asbesto en la industria automotriz (Morejón y Narváez, 2005, p. 31).

Los polímeros reforzados con fibra natural han venido emergiendo en los últimos años como una opción más respetuosa con el medio ambiente y económica en

comparación con fibras sintéticas como la aramida, fibra de vidrio o carbono. Las fibras lignocelulósicas poseen factores que favorecen su uso, como: propiedades aceptables de esfuerzo, bajo costo, baja densidad, no abrasivos, mayor recuperación de energía, y biodegradables. Además, poseen buena estabilidad térmica y proporcionan excelente aislamiento para el calor y el ruido (Amin, Anuar y Badri, 2007, p. 2488).

Los poliuretanos son utilizados en varias aplicaciones tecnológicas debido al bajo costo de procesamiento, la facilidad con la que se puede obtener material en grandes dimensiones y la variedad de reactivos que conducen a productos con diferentes propiedades físicas, químicas y mecánicas. Dependiendo de la materia prima y de la composición, el poliuretano se puede utilizar para la fabricación de una amplia gama de productos tales como adhesivos, recubrimientos, elastómeros y espumas rígidas y flexibles. La espuma rígida de poliuretano es usada en el campo del transporte, tecnología de refrigeración y electrodomésticos, industria de la construcción, industria automotriz, empaque, refuerzo de alfombras y artículos deportivos (Gnauck y Fründt, 2007, p. 249). El uso del poliuretano en aplicaciones que requieren elevadas propiedades mecánicas es muy limitado, es por esto que materiales compuestos de poliuretano se desarrollan con el fin de obtener un material compuesto con mayores propiedades (Singh, 2011, p. 511).

De esta manera en este trabajo, se busca conseguir la disminución de costos de producción mediante la incorporación de materiales locales naturales, lo cual es una vía para incrementar la competitividad de los productos ecuatorianos. Con el objetivo de aprovechar los recursos naturales disponibles en el país, y en busca de alternativas que sean económicamente viables para el refuerzo de matrices poliméricas, se desarrollaron materiales compuestos con matrices de poliuretano reforzado con fibras naturales de cabuya y raquis de palma africana.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. POLIURETANO

1.1.1. ANTECEDENTES

El poliuretano atrajo la atención de los investigadores en el año 1849 cuando Wurtzdhk Hoffman de Alemania reportó la reacción del compuesto hidroxilo con un isocianato. Otto Bayer estudió el desarrollo comercial del poliuretano en 1937 pero Rinkie y sus colaboradores encontraron su uso comercial en 1938. En 1940 se desarrollaron las espumas de poliuretano por los investigadores A. Höchtlen y W. Droste, quienes observaron que los poliésteres con grupos carboxilos reaccionaban con diisocianatos y se formaba poliéster-uretanos esponjosos, debido a que se desprendía anhídrido carbónico gaseoso. La producción comercial del poliuretano comenzó en el año de 1954 y se comercializan como termoestables, elastómeros, elastómeros termoplásticos y espumas (Singh, 2011, p. 511).

La espuma de poliuretano es el polímero termoestable más importante y es fabricado en grandes cantidades tanto del tipo flexible como del tipo rígido. El poliuretano también es fabricado como sólido y semirrígido. Se estima que la demanda a nivel mundial de las espumas poliuretano se encuentra alrededor del 5% del consumo total de polímeros. La espuma flexible se produce en un volumen del 48%, la espuma rígida es producida en un volumen del 28%, los elastómeros de poliuretano (sólido) se producen en un volumen del 15% y el poliuretano semirrígido "piel integral" es producido en un volumen del 9% (Lee, Ooi, Chuah y Ahmad, 2007, p. 1161).

1.1.2. GENERALIDADES

El poliuretano es un polímero que contiene un grupo funcional uretano (-NHCOO) resultado de la reacción por poliadición de isocianato ($R-N=C=O$) con un

componente que tenga por lo menos dos átomos activos de hidrógeno (R-OH-). La migración del átomo de hidrógeno del grupo hidroxilo del alcohol hacia el grupo isocianato vecino conlleva a la aparición de grupos uretanos. Estructuralmente el poliuretano es un polímero extremadamente largo y complejo que puede contener hidrocarburos aromáticos y alifáticos, ésteres, éteres, amidas, úrea, biuret, alofanato, carbodiimida y grupos isocianurato, además de los enlaces de uretano. Dependiendo de los ingredientes y de la composición, el poliuretano se puede utilizar para la fabricación de una amplia gama de productos tales como adhesivos, recubrimientos, elastómeros y espumas rígidas y flexibles.

La geometría de la celda de la espuma de poliuretano es cerrada, con un contenido de celda cerrada normalmente entre 85 y 95%, dicha geometría es necesaria para evitar la absorción de agua y la permeabilidad a la humedad. Las espumas de celda cerrada son generalmente rígidas por naturaleza y son las más adecuadas para el aislamiento térmico debido al gas que se encuentra encerrado dentro de las celdas, el valor de conductividad térmica es de 0,028 W/m.K. El poliuretano rígido, al ser un material poroso que permite el paso del aire, también permite el paso del sonido y por ende no puede tener buenas propiedades de aislante acústico. No obstante, si se combina con otros materiales puede usarse para reducir la transmisión del ruido. La densidad del poliuretano rígido es baja pero depende de la formulación con la que se lo fabrique, generalmente varía entre 30 y 50 kg/m³ (Lee y Ramesh, 2004, pp. 257-260).

Las propiedades mecánicas de la espuma rígida de poliuretano están en función de la densidad, a mayor densidad de la espuma aumentan el valor de la resistencia a la tracción, compresión, flexión y cizallamiento. La espuma rígida de poliuretano posee alta capacidad de adherencia, lo que permite combinar las propiedades de la espuma con las propiedades de los revestimientos y así crear de diseños únicos de materiales compuestos. Además posee alta resistencia al ataque de disoluciones salinas, detergentes, ácidos y bases diluidas, hidrocarburos alifáticos y aceites minerales. Posee una buena resistencia a la intemperie y baja permeabilidad a la humedad (Atepa, 2010, pp. 12-33).

1.1.3. PROCESO DE REACCIÓN DE LA ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO

La espuma rígida de poliuretano se prepara mediante la mezcla de polioliol con catalizadores, agentes tensoactivos, extendedores de cadena, agentes soplantes químicos y físicos, en una primera etapa. En una segunda etapa la mezcla de polioliol reacciona con diisocianato. Durante la mezcla algunas burbujas de aire se introducen en la mezcla y sirven como núcleos para las celdas de espuma, los núcleos convertidos en burbujas son estabilizados por los agentes tensoactivos. La formación de espuma del poliuretano rígido puede llevarse a cabo por agentes soplantes químicos o por agentes soplantes físicos o por la mezcla de ambos. El agua, el agente soplante químico que más ampliamente se utiliza, reacciona con diisocianato formando inicialmente ácido carbámico inestable el cual inmediatamente se descompone en una amina y dióxido de carbono. El dióxido de carbono se difunde en las burbujas de aire ya presentes lo que genera un aumento de la espuma debido al incremento en el tamaño de las burbujas. Al mismo tiempo, la viscosidad del medio aumenta debido a la polimerización. Los agentes soplantes físicos más ampliamente usados son los clorofluorocarbonos (CFCs) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs).

La formación de la espuma rígida de poliuretano se basa principalmente en la reacción de polioliol con diisocianato. La reacción es exotérmica, y el calor de reacción es usado para formar la estructura de celdas por medio de la evaporación de los agentes soplantes físicos. Las reacciones isocianato-uretano e isocianato-úrea conducen a la ramificación y entrecruzamiento en la estructura de la espuma rígida de poliuretano mediante la formación de alofanato y biuret, respectivamente. Los alofanatos son producto de la reacción de los isocianatos con uretanos, y la reacción del isocianato con úrea produce el grupo biuret. (Singh y Jain, 2009, pp. 1115-1118). En la Figura 1.1 se observa la reacción del poliuretano.

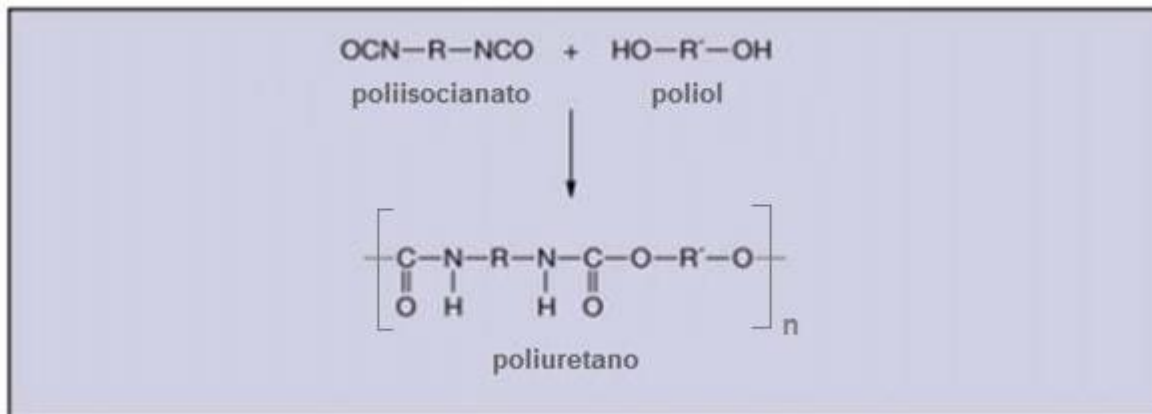


Figura 1.1. Reacción del poliuretano
(Kapps, 2004, p. 3, imagen traducida)

Durante el proceso de reacción y espumación se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Tiempo de mezclado o de agitación: es el tiempo que se necesita para alcanzar una mezcla uniforme de los reactivos.
- Tiempo de crema o de arranque: indica el tiempo desde que se inicia la mezcla de los reactivos hasta cuando se hace visible la formación de espuma, comienza la formación de polímeros. Se aprecia un cambio de color.
- Tiempo de hilo: es el tiempo que transcurre cuando la mezcla pasa de estado líquido a sólido desde el inicio del mezclado, ocurre la estructuración y formación de redes cristalinas. En este punto la reacción alcanza un 35% de conversión.
- Tiempo de expansión: es el tiempo hasta cuando finaliza la expansión de la espuma y la formación de celdas.
- Tiempo de tacto libre: al finalizar la reacción se comienza a formar la piel y la superficie deja de ser adhesiva (Szycher, 2005, p. 819).

1.1.4. PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO

1.1.4.1. Método de mezclado manual

El método de mezclado manual es cuando se colocan los componentes del poliuretano en un recipiente y son mezclados con la ayuda de un agitador eléctrico. Este método es utilizado para el desarrollo y control de nuevos materiales a escala de laboratorio y producir bloques de pequeño volumen. El objetivo de la producción de espumas a nivel de laboratorio es determinar o ajustar los tiempos de reacción y las condiciones de producción para la elaboración de la espuma a escala industrial, con una baja inversión. El mezclado manual permite trabajar con líquidos viscosos, sólidos o pastas. La desventaja del método es la pérdida del material adherido en el envase de mezclado. En los casos más simples el molde puede ser fabricado de madera cuyo interior debe ser liso para que se facilite el desmoldeo o, para mejores resultados se puede utilizar un molde con paredes de aluminio. Se utiliza cera desmoldante o se coloca papel con una capa de polietileno en las paredes del molde para que la plancha no se quede adherida (Klempner y Frisch, 2007, p. 82).

1.1.4.2. Método de mezclado con máquinas

Normalmente las materias primas del poliuretano son procesadas en esponjas con la ayuda de máquinas. La instalación para la producción consta de por lo menos una máquina de espumado y un dispositivo de moldeo. La máquina de espumado es el corazón de la instalación porque recibe los componentes líquidos, los lleva a un estado en el que pueden ser procesados, los dosifica en las correctas proporciones, mezcla los componentes y descarga la mezcla. En la Figura 1.2 se muestra las etapas individuales del proceso.

El polioliol e isocianato, componentes principales para la producción de poliuretano, son llevados desde sus tanques de almacenamiento hacia los tanques de uso diario. Los componentes son transportados a una temperatura estable y en una

solución homogénea. Luego, los componentes son llevados por unidades transportadoras desde los tanques de uso diario hasta el cabezal de mezcla con la respectiva relación de mezclado. Los componentes cuando llegan al cabezal son combinados para formar la mezcla de reacción. La mezcla es descargada en un molde y luego se expande. En la mayoría de los casos, el procesamiento implica un sistema de dos componentes, ya que los aditivos como los catalizadores, tensoactivos, agentes soplantes o retardantes de llama se encuentran contenidos dentro de uno de los componentes principales. Sin embargo, los aditivos también pueden ser adicionados en estaciones de pre-mezclado o pueden ser añadidos en las líneas dosificadoras de las bombas (Hepburn, 2012, p. 178).

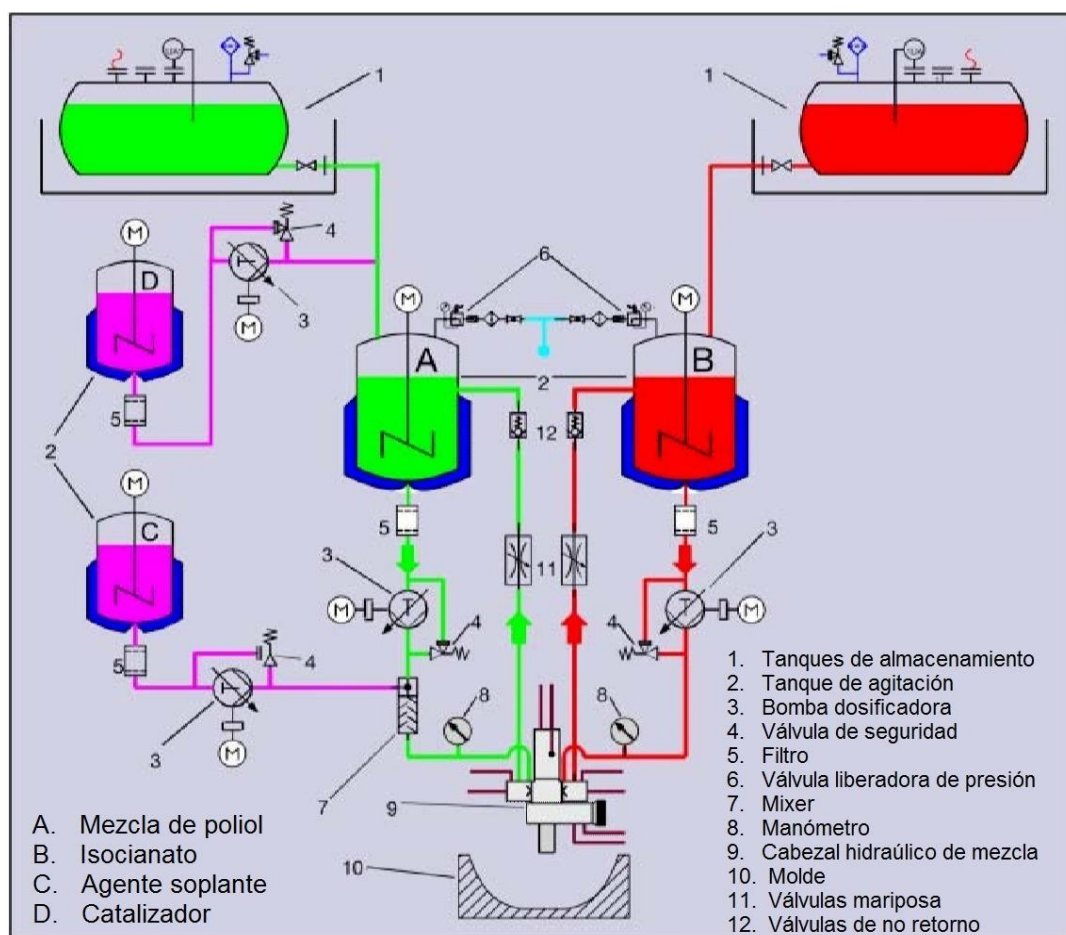


Figura 1.2. Esquema del proceso de la fabricación del poliuretano
 (Kapps, 2004, p. 24)

En general, se hace una distinción entre dos sistemas de máquinas: máquinas de baja presión y de alta presión. En las máquinas de baja presión los componentes

son transportados al cabezal de mezcla en corrientes cuya presión varía de 3 a 40 bar, y en máquinas de alta presión los componentes son comprimidos a una presión de 150 a 300 bar mediante bombas de pistón y luego son mezcladas por el choque en la inyección. La alta energía cinética con la que entran al cabezal las corrientes de los componentes es usada para realizar la mezcla (Lee, 2005, p.546).

1.1.4.3. Producción de tableros y paneles con revestimientos de espuma rígida de poliuretano

Para la producción de tableros y paneles de espuma rígida de poliuretano existe una gran variedad de revestimientos que son económicos y eficientes. Si el revestimiento rígido se lo realiza a ambos lados se obtienen paneles sándwich de bajo peso, alta rigidez y excelente capacidad de aislamiento térmico. Los paneles sándwich de metal que son revestidos con espuma rígida conservan la capacidad aislante del poliuretano. Existen numerosas posibilidades de combinación de espumas rígidas de poliuretano con diferentes revestimientos, la lámina de metal revestida es resistente a la torsión. Las planchas aislantes presentan distintos espesores que varían desde espesores de una lámina de papel hasta espesores de 24 cm. Además, existe la posibilidad de combinación de espuma de poliuretano con revestimiento flexible en un lado y revestimiento rígido en el otro lado, sin embargo, este tipo de construcción pueden presentar deformaciones (Fam y Sharaf, 2010, p. 2927).

1.1.4.4. Producción in-situ de espuma rígida de poliuretano

In-situ (spray) se trata de producir la espuma rígida de poliuretano directamente en el sitio utilizando la técnica de vertido (capa por capa) y la técnica de aspersion. Cuando se coloca la espuma en techos, paredes de construcción y tanques de almacenamiento, se debe tomar en cuenta las variaciones de temperatura y la humedad atmosférica. La ventaja de la producción de espuma in-situ es que no es necesario transportar grandes volúmenes de espuma, sólo las materias primas y

la máquina de formación de espuma. Con este método se puede recubrir con una capa de espuma relativamente uniforme incluso superficies complicadas. Para producir el spray de poliuretano se utiliza una máquina de alta presión, provista de un cabezal de mezcla que tiene integrado una pistola de pulverización que se puede iniciar y detener cuando se desee. Las máquinas son transportables y equipadas con mangueras de largo alcance que llegan hasta el cabezal de mezcla. (Kapps, 2004, p. 40).

1.1.5. APLICACIONES DEL POLIURETANO RÍGIDO

Algunas aplicaciones de ingeniería típicas de las espumas rígidas de poliuretano están el campo del transporte, tecnología de refrigeración y electrodomésticos, industria de la construcción, industria automotriz, empaque, refuerzo de alfombras y artículos deportivos.

Dentro de la industria de la construcción se lo utiliza como aislamiento térmico mediante la elaboración de planchas aislantes para tejados, núcleos de espuma para estructuras sándwich, hormigón ligero espumado, espuma de relleno de grietas de muros y canalizaciones subterráneas. En la tecnología de refrigeración se lo usa como aislamiento térmico en: cámaras frigoríficas, refrigeradores, camiones cisterna, tuberías de calefacción y para depósitos de agua caliente. Se las utiliza en aplicaciones marítimas como material de construcción de barcos, lanchas, flotadores y diques, debido a las buenas propiedades de flotación que presentan las espumas rígidas, además de no ser afectadas por el agua salada y la gasolina (Gnauck y Fründt, 2007, p. 249).

1.2. FIBRAS NATURALES

Se puede definir a las fibras naturales como fibras de origen biológico o fibras de origen vegetal y animal. Esta definición incluye todas las fibras celulósicas (algodón, yute, cabuya, coco, abacá, ramio, etc.) y fibras basadas en proteínas

(lana y seda). Se excluyen a las fibras minerales como los asbestos que se dan de forma natural pero no son de origen biológico. Las fibras naturales son producidas y utilizadas alrededor del mundo para la fabricación de una amplia gama de productos tradicionales y novedosos. Las fibras naturales son renovables, de naturaleza biodegradable y de bajo consumo energético en su procesamiento (Van Dam, 2008, pp. 3-4).

Las fibras naturales de origen vegetal están compuestas de micro fibrillas complejas de polímeros. Son sustancias complejas, en combinación heterogénea entre cadenas poliméricas de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. Las plantas de las que se obtiene son: algodón, abacá, cabuya, lino, mimbre, bambú, yute, ceibo, coco, paja toquilla, piña, palma africana, banano, mimbre, ramio. La celulosa constituye el esqueleto de las paredes de la célula, la hemicelulosa permite la biodegradación y proporciona resistencia mecánica a las fibras, y la lignina se encarga del transporte de las soluciones acuosas y proporciona rigidez a la pared celular.

Tabla 1.1. Composición química de algunas fibras naturales

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Lino	60	16	4
Yute	60	15	16
Cáñamo	67	16	8
Abacá	63	20	6
Cabuya	62	13	15
Palma africana	48	17	25

(Vásquez, 2011, p. 24)

A las fibras vegetales se las clasifica con base en la parte de la planta donde se extrae la fibra: fibras de semilla que están conformadas por células individuales como el algodón; fibras del tallo que forman parte del tejido esquelético de la planta como el lino, cáñamo, yute y ramio; fibras de hoja son fibras presentes en los tejidos de las hojas como el abacá, cabuya, sisal y piña; fibra de fruto como el coco y la palma africana (Vásquez, 2011, pp. 22-26).

1.2.1. FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA

La palma africana es una planta de cuyos frutos se extrae aceite vegetal. Los frutos se encuentran contenidos en racimos. Para la extracción de aceite se realiza un proceso de desfrute donde el racimo vacío se lo conoce como raquis. El raquis de palma africana está conformado por un tallo principal, de donde se obtiene las fibras, y de varias pequeñas espigas afiladas en las puntas. En el Ecuador existen 250 000 hectáreas de cultivo de palma africana a lo largo de 11 provincias donde destacan las provincias de Santo Domingo, Los Ríos, Esmeraldas, Sucumbíos y Francisco de Orellana (Mejía, 2012, pp. 1-7). En la Figura 1.3 se observa la planta y el racimo de palma africana.



Figura 1.3. a) Planta de palma africana y b) Racimo de fruta de palma africana
(Mejía 2012, p.3 y p. 10)

La industria aceitera de palma africana genera abundante cantidad de biomasa cada año, el raquis de palma africana es biomasa que se usa en las propias fábricas para la generación de energía o es quemada para ser usada como fertilizante. Sin embargo, la quema genera mucha contaminación ambiental por lo que se vuelve un reto la utilización de estos residuos para la creación de productos de valor agregado a partir de la biomasa.

La fibra de raquis de palma africana presenta microfibrillas que se encuentran alineadas paralelamente para formar una estructura cristalina además de algunas

regiones amorfas. La formación de la estructura química interna de las fibras naturales depende de geografía, las condiciones del suelo y de la edad de la planta. Las fibras de raquis de palma africana poseen buenas propiedades térmicas ya que comienzan a degradarse a una temperatura de 332°C. Las propiedades mecánicas de esta fibra se encuentran detalladas en la Tabla 1.2 (Hassan et al, 2010, pp. 2080-2084).

Las fibras de raquis de palma africana se las utiliza como: alimento para animales, combustible para la generación de energía, abono orgánico, elaboración de esteras, rellenos de tableros de madera, refuerzo en hormigón armado y refuerzo en la industria de pulpa y papel (Mejía, 2012, p. 11).

1.2.2. FIBRA DE CABUYA

La cabuya es una planta que se encuentra a lo largo de la sierra ecuatoriana, cultivada en los valles y en las estribaciones de la cordillera. Las hojas de la planta de cabuya crecen desde un tronco central con un tamaño entre 0,6 y 2 metros de longitud. Las fibras se encuentran encajadas longitudinalmente en las hojas, por lo que para la extracción de las fibras las hojas son machacadas, raspadas, lavadas y secadas. El cultivo de cabuya es muy tradicional en el Ecuador, desde tiempos de la colonia. Actualmente en el Ecuador hay 2 348 hectáreas de cultivo de cabuya, donde el 95 % de los cultivos se encuentran divididos entre las provincias de Imbabura y Carchi.

La fibra de cabuya es un tipo de fibra dura porque provienen de la hoja de la planta, las microfibrillas están unidas entre sí por una goma vegetal que se superponen para formar filamentos multicelulares. Existen dos tipos de fibra en la hoja, las fibras que se encuentran en la línea media de la hoja y las fibras que se encuentran en la periferia de la hoja, desechándose las primeras porque son muy frágiles (Vásquez, 2011, pp. 32-35). En la Figura 1.4 se observa la planta de cabuya que crece en la sierra de nuestro país.



Figura 1.4. Planta de cabuya
(Tamayo, 2012, p. 27)

Las fibras de cabuya poseen buenas propiedades térmicas ya que pueden ser expuestas a temperaturas mayores de 200°C sin degradarse. Son fibras livianas ya que poseen una densidad de 1,3 g/cm³. En cuanto a las propiedades mecánicas de la fibra de cabuya, se encuentran detalladas en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas de la fibra de raquis de palma africana y de la cabuya

Fibra	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a la rotura (%)
Raquis	1,1	100 - 400	1 - 9	8 - 18
Cabuya	1,3	237 - 700	9 - 30	5 - 14

(Morejón y Narváez, 2005, p. 29 y; Mahjouhb et al., 2013, p. 2)

La fibra de cabuya es una de las más usadas en el mundo, que crece libremente en la naturaleza y posee ciclos cortos de renovación. Se la utiliza para la confección de artículos artesanales, tapetes, alfombras, hilos, cuerdas, costales, sogas, cepillos, sombreros, alpargatas, bolsos, hilos para redes, y para dar resistencia al papel reciclado y a la pulpa de fibra de madera reciclada. También se lo usa como sustituto para la fibra de vidrio y asbesto en la industria automotriz y elaboración de materiales para techos y cisternas de agua, debido a que las fibras son ásperas y muy resistentes (Morejón y Narváez, 2005, pp. 27-31).

1.2.3. TRATAMIENTOS QUÍMICOS APLICADOS A LAS FIBRAS

Los polímeros compuestos con fibra natural presentan como principal inconveniente la unión interfacial entre la fibra y el polímero causado por la naturaleza hidrofílica de la fibra natural contra la naturaleza hidrofóbica del polímero la cual puede ser mejorada por tratamiento químico de la superficie de la fibra. La fibra natural es altamente hidrofílica debido a la atracción o la interacción entre los grupos hidroxilo de la fibra con las moléculas de agua. La alta sensibilidad a la humedad de la fibra lignocelulósica provoca la inestabilidad dimensional y limita el uso de la fibra como refuerzo en materiales compuestos. Bajas propiedades interfaciales entre fibra y matriz debido a la naturaleza hidrófila de la fibra reducen su potencial uso como agentes de refuerzo, por lo que se hace necesario realizar modificaciones químicas para optimizar la interfaz (Mahjoub, Mohamad y Mohd, 2013, p. 2).

Existen varios tratamientos químicos que se realizan en las superficies de la fibra natural con la finalidad de mejorar la interfaz matriz-fibra, como por ejemplo el tratamiento alcalino, tratamiento con silanos, tratamiento con peróxidos, tratamientos con isocianatos y acetilación. Generalmente, los agentes de acoplamiento químico son moléculas que poseen dos funciones, la primera función es la de reaccionar con los grupos hidroxilo de la fibra y la segunda es reaccionar con los grupos funcionales de la matriz (Bledzki, Mamun, Lucka y Gutowski, 2008, pp. 413-414).

La acetilación se basa en la reacción del grupo hidroxilo de la pared celular de una sustancia lignocelulósica con anhídrido acético o con anhídrido propanoico a elevadas temperaturas. En la reacción se sustituye el hidrógeno del grupo hidroxilo de la pared celular con un grupo acetilo del anhídrido acético produciendo un ácido carboxílico y un grupo éster en la fibra. De esta manera se modifican las propiedades de la fibra para que se convierta en hidrofóbica. Los grupos hidroxilo que reaccionan con el reactivo son aquellos que están presentes en la lignina y en la hemicelulosa, mientras que los grupos hidroxilo de la celulosa están muy compactados con puentes de hidrógeno que evita la difusión del reactivo y por lo

tanto da lugar a muy bajos grados de reacción (Cristaldi, Latteri, Recca, y Cicala, 2010, p. 330). En la Figura 1.5 se observa el esquema de reacción de la acetilación.

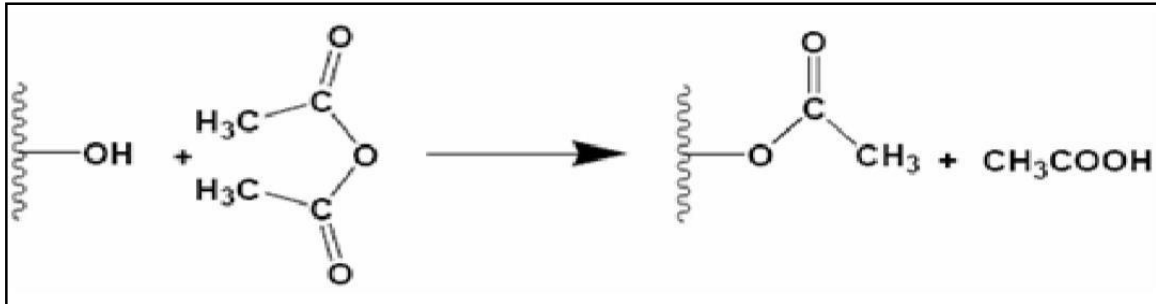


Figura 1.5. Esquema de la reacción de acetilación
(Bledzki et al., 2008, p. 413)

En la elaboración de materiales compuestos, con la acetilación se anticipa una mejora en la resistencia a la tracción y módulo debido a que se reduce la naturaleza hidrofílica de la fibra mejorando la compatibilidad entre la matriz y la fibra. Que la fibra se convierta en hidrofóbica significa que se estabiliza la pared celular de la fibra contra la humedad, mejora la estabilidad dimensional, la dispersión de las fibras en la matriz y la degradación ambiental. Además el tratamiento químico hace a la superficie de la fibra más lisa (Hill y Abdul, 2000, p. 1686).

1.3. MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto es un material heterogéneo creado por el montaje de dos: matriz y carga, con el objetivo de obtener un material con características y propiedades específicas. La matriz puede ser de origen cerámico, metálico o polimérico. La matriz da al material compuesto su forma, apariencia superficial, tolerancia al medio ambiente y tiempo de vida útil, mientras que el refuerzo se encarga del esfuerzo estructural dando rigidez y fuerza macroscópica. Las propiedades del material compuesto se encuentran controladas por el comportamiento y las características de la interface.

El desarrollo de materiales compuestos con propiedades mecánicas superiores ha abierto nuevos horizontes en el campo de la ingeniería. Ventajas como resistencia a la corrosión, aislamiento eléctrico, reducción en costos de ensamblaje, baja expansión térmica, mayor rigidez y fuerza, resistencia a la fatiga, etc., han hecho que los materiales compuestos sean ampliamente aceptados en aplicaciones estructurales. Sin embargo, los materiales compuestos también presentan desventajas, constituyendo una barrera para su uso a gran escala, como por ejemplo: su naturaleza compleja, la falta de experiencia de los diseñadores, poco conocimiento de las bases de datos de materiales y la dificultad en la fabricación de materiales compuestos.

Los materiales compuestos pueden ser clasificados con base en la forma de sus componentes estructurales: fibrosos (compuestos de fibras en una matriz), laminares (compuesto de capas de materiales) y particulados (compuesto de partículas en una matriz). Los particulados pueden ser subdivididos en hojuelas (hojuelas planas en una matriz) y esqueléticos (compuesta por una matriz esquelética llenada con un segundo material). En general, los refuerzos pueden ser fibrosos, en polvo, esféricos, cristalinos o en filamentos que pueden ser de origen orgánico, inorgánico, metálico o cerámico (Pickering, 2008, p. 67).

Los materiales compuestos de matriz polimérica se pueden clasificar dependiendo si la matriz es de polímero termoestable o termoplástico. Los materiales compuestos con matriz polimérica termoestable son mucho más comunes, pero los materiales compuestos con matriz polimérica termoplástica son actualmente el centro de un rápido desarrollo. Las matrices termoplásticas son polímeros de estructura semicristalina o amorfa que consisten de moléculas de cadena lineal o ramificada con fuertes enlaces intramoleculares pero con enlaces intermoleculares débiles, con calentamiento se suavizan o funden pero pueden volver a tomar su forma si se les aplica calor o presión. Las matrices termoestables tienen estructuras reticuladas o de red con enlaces covalentes entre todas las moléculas, con el calor no se ablandan pero se descomponen y no pueden volver a tomar su forma (Chung, 2010, pp. 8-10).

Las fibras naturales que refuerzan los materiales compuestos de matriz polimérica ofrecen buenos desempeños mecánicos y son más seguros con el medio ambiente. La aplicación de los materiales compuestos con fibras naturales se ha incrementado rápidamente, debido a la preocupación que existe sobre la sostenibilidad global puesto que las fibras sintéticas tienen enorme impacto en el deterioro del planeta. Aunque en general el esfuerzo a la tracción de las fibras naturales es más bajo que el de fibras sintéticas, el esfuerzo a la tracción de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales es suficiente para los productos plásticos domésticos o del hogar. Fibras naturales como el lino, cáñamo, sisal, coco, raquis de palma africana y yute tienen ventajas técnico-económicas y ecológicas sobre las fibras sintéticas como la fibra de vidrio. La combinación de interesantes propiedades mecánicas y físicas conjuntamente con su carácter amigable con el medio ambiente ha despertado el interés de diversos sectores industriales, especialmente de la industria automotriz. Las ventajas y desventajas de usar fibras naturales en materiales compuestos están detalladas en la Tabla 1.3. Fibras lignocelulósicas tienen ventaja sobre las sintéticas puesto que se doblan en lugar de romperse durante el procesamiento y la fabricación (Yang, Zhao, Quin, Zu, Jin y Wang, 2004, p. 1193- 496).

Tabla 1.3. Ventajas y desventajas del uso de fibras naturales en materiales compuestos

Ventajas	Desventajas
Bajo peso específico, comparado con materiales compuestos con fibra de vidrio	Pobre resistencia a la humedad
Recurso renovable con producción que requiere bajas emisiones de CO ₂	Enorme variabilidad
El ambiente de trabajo es amigable con mejores condiciones de trabajo	Pobre resistencia al fuego
Alta resistencia eléctrica	Bajo tiempo de vida útil
Buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico	Se requiere grandes áreas de cultivo para producción
Biodegradabilidad	Falta de adhesión entre la fibra y la matriz

1.3.1. MATERIALES COMPUESTOS DE ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO

Las propiedades de espumas formuladas a partir de isocianato (poliuretanos) pueden ser modificados por la adición de cargas. Las cargas pueden ser utilizadas para modificar las propiedades mecánicas, resistencia al impacto y resistencia térmica; para modificar el color; para mejorar la biodegradabilidad; y para disminuir el costo del producto. Tanto fibras inorgánicas (fibra de vidrio, carbonato de calcio, talco, mica, etc.) como fibras naturales (harina de madera, yute, lino, etc.) se pueden añadir como cargas a las espumas a base de isocianato (Johnson y Shivkumar 2004, p. 2469).

Se ha elaborado material compuesto de espuma rígida de poliuretano con fibra sintética, Yang et al. (2004) estudiaron la influencia del polvo de dióxido de silicio y vidrio, nylon 66, y poliacrilonitrilo en la resistencia a la tracción de la espuma del poliuretano rígido. Estos autores observaron que una carga de 3,5% en peso de fibra de poliacrilonitrilo proporciona un aumento en la propiedades mecánicas tanto en la resistencia a la tracción y en el módulo de Young (pp. 1493-1500).

También se ha producido material compuesto de poliuretano con fibra natural como material de carga, Bledzki et al. (2005) utilizaron telas de lino y yute tejidas como refuerzos para espumas de poliuretano; materiales compuestos de fibra de lino mostraron una mayor resistencia mecánica que la observada por la fibra tejida de yute (pp. 2406-2411). Silva et al. (2010) estudiaron la influencia de fibras de celulosa en las propiedades morfológicas, térmicas y mecánicas de los materiales compuestos de poliuretano; la introducción de fibras de celulosa a espumas rígidas de poliuretano disminuyó ligeramente su conductividad térmica pero no hubo cambio en la resistencia mecánica y la estabilidad térmica del material compuesto (pp. 3366-3370).

Un importante aspecto que hay que tomar en cuenta cuando se utiliza cargas de origen vegetal para la fabricación de espumas de poliuretano es que estos materiales compuestos, a causa de la presencia de fibras de celulosa, muestran susceptibilidad al ataque de hongos en ambientes húmedos, que puede ser un

atributo deseable para disminuir el impacto ambiental después del desecho del producto. La ventaja de utilizar fibras naturales en espumas rígidas de poliuretano es la presencia de grupos hidroxilo en la superficie de la fibra, que pueden reaccionar con el isocianato para producir enlaces covalentes en la interfaz matriz-fibra natural (Silva et al., 2010 pp. 3665-3671).

1.3.2. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

1.3.2.1. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se encuentran dentro de las propiedades más importantes para la selección de materiales para una aplicación específica. Prácticamente todas las aplicaciones implican una respuesta del material a algún tipo de carga. El comportamiento mecánico se enfoca en la deformación que ocurre cuando se aplica una carga, la deformación dependerá de la configuración del material (peso molecular, orientación molecular, tipos de enlaces, cristalinidad, entre otros) y de la manera en que el esfuerzo es aplicado (Hylton, 2004, p. 17).

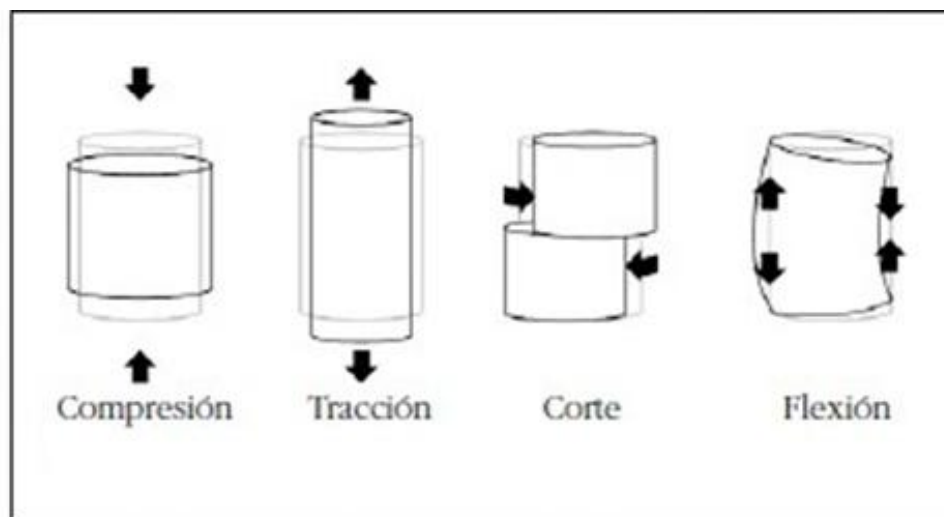


Figura 1.6. Esfuerzos de compresión, tracción, corte y flexión

El comportamiento mecánico de un material puede ser evaluado mediante un ensayo de esfuerzo-deformación, donde una carga estática o relativamente lenta

con el tiempo es aplicada de manera uniforme sobre una superficie del material. La carga se puede aplicar de cuatro maneras: tracción, flexión, compresión y cizalla (corte). En la Figura 1.6 se ilustran esquemáticamente los tipos de carga mencionados (Callister, 2007, p. 114).

Se entiende por esfuerzo (σ) al cociente entre la fuerza aplicada al material y el área de la sección transversal del material donde es aplicada la fuerza.

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} \quad [1.1]$$

Se entiende por deformación (ε) al cambio cuantificable de las dimensiones del material en relación con las dimensiones originales. Esto es, si el material que tiene una longitud (L_0) es estirado hasta una nueva longitud (L), la deformación es el cociente entre la diferencia de longitudes y la longitud original.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [1.2]$$

El módulo de Young (E) es un parámetro propio del material que sirve para determinar el comportamiento del material cuando a éste se le aplica una fuerza, es una propiedad única del material que se relaciona a las características del polímero. El módulo indica la resistencia o rigidez de un material. Es cuantificado por el cociente entre el esfuerzo y la deformación cuando la deformación se limita a la deformación elástica solamente, el módulo es expresado en pascales o en libras por pulgada cuadrada. El esfuerzo es directamente proporcional a la deformación (Askeland y Phulé, 2004, p. 256).

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \quad [1.3]$$

En la Figura 1.7 se ilustra la relación esfuerzo-deformación de un polímero dúctil. El esfuerzo es la variable dependiente en el eje-y y la deformación es la variable independiente ubicada en el eje-x. Primero, a bajas deformaciones, los materiales poliméricos se comportan como un sólido elástico, es decir, el material recupera su

longitud original una vez que cese la aplicación de la fuerza. Esto se encuentra representado por la sección A-C (zona elástica), la pendiente de dicha recta es el valor del módulo de Young. A mayor módulo mayor rigidez del material, caso contrario, con módulos bajos los materiales son flexibles.

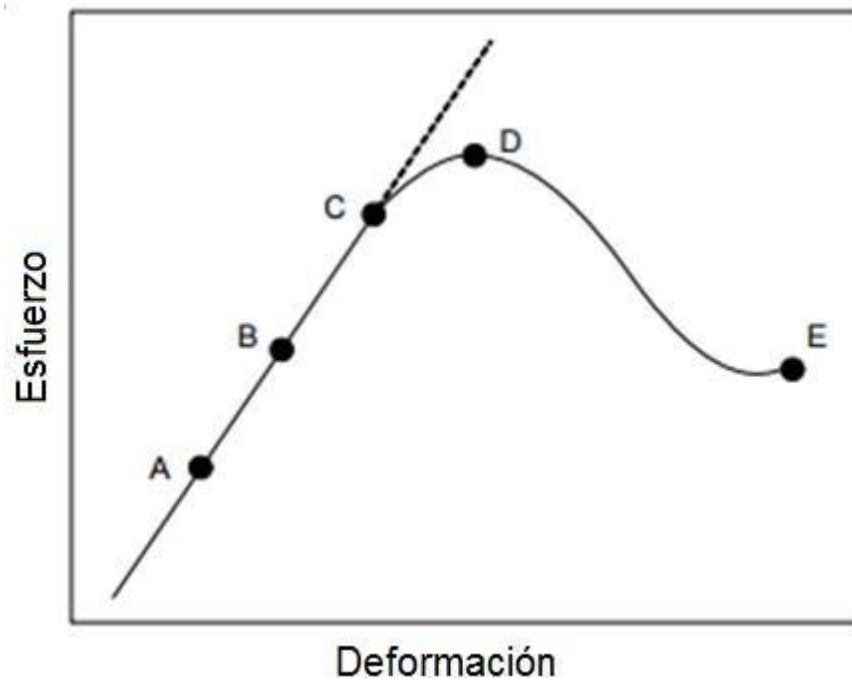


Figura 1.7. Curva esfuerzo-deformación para los polímeros dúctiles
(Hylton, 2004, p.18, traducida)

La línea comienza a desviarse desde el punto C, llamado punto de fluencia o límite de elasticidad y es una cantidad usada para la caracterización de materiales. A partir del punto de fluencia el material sufre una deformación irreversible, a la cual se la llama zona plástica. El punto D es el punto más alto en la gráfica y se lo conoce como resistencia a la tracción o esfuerzo máximo. La deformación al pico se refiere al porcentaje que se puede estirar el material cuando se alcanza el esfuerzo máximo. Como se muestra en la figura, el material continúa estirándose hasta el punto E, que se llama punto de ruptura, y se la expresa en porcentaje (Husić, Javni y Petrović, 2005, pp. 21-24).

- **Ensayos de tracción**

Las pruebas de tracción son usadas para evaluar, seleccionar y diseñar materiales. En los resultados se reportan distintos parámetros, como por ejemplo: desplazamiento al pico, deformación al pico, carga máxima, esfuerzo máximo (resistencia a la tracción) y módulo de Young. Cada valor tiene significados específicos. Los parámetros contienen información significativa acerca del esfuerzo, utilidad y comportamiento de un material. Por ejemplo, un material que posee un alto esfuerzo de tracción y baja deformación significa que el material es duro pero quebradizo, materiales compuestos y muy rellenos presentan esta cualidad. Materiales con bajo esfuerzo de tracción y alta deformación son débiles y dúctiles, típico de materiales elastómeros termoplásticos (Askeland y Phulé, 2004, p. 240).

Tanto las dimensiones y forma de las muestras como las condiciones para el ensayo de tracción están estandarizadas por la norma ASTM D638 (materiales poliméricos) y ASTM D3039 (materiales compuestos con matriz polimérica). Las probetas tienen una forma característica de un “hueso de perro”, llamado halterio. La razón por la que las muestras tienen esta forma es para que el desplazamiento se realice en la parte central.

La muestra se coloca en las mordazas de la máquina de ensayos universales, la cual ejerce una fuerza de tracción sobre la muestra a las condiciones establecidas. La fuerza requerida para estirar la muestra y la cantidad que se estira son cuantificadas. Estos valores conjuntamente con el área de la sección transversal son usados para calcular los parámetros de tracción. Los parámetros que se evalúan en los ensayos de tracción son: resistencia a la tracción, deformación al pico y módulo de Young. (Yang et al. 2004, p. 1496).

- **Ensayo de flexión**

El ensayo de flexión es similar al de tracción, en cual se un esfuerzo que dobla el material en tres puntos. El ensayo de flexión es importante cuando se quiere cuantificar la rigidez del material, y el material es usado en el diseño para aplicaciones estructurales. Mientras la muestra se va doblando, la deformación aumenta, sin que se presente algún deslizamiento en el lugar donde la muestra se encuentra apoyada. En los resultados del ensayo de flexión se reportan el módulo de flexión, el esfuerzo máximo (resistencia a la flexión), carga máxima, deformación en el punto de fluencia y desplazamiento en el punto de fluencia (Herrera y Valadez, 2004, p. 342).

Tanto las dimensiones y forma de las muestras como las condiciones para el ensayo de tracción están estandarizadas por las normas ASTM D790 (materiales poliméricos) y ASTM D7264 (materiales compuestos con matriz polimérica). La distancia entre los soportes (span) es normalmente 16 veces mayor que el espesor (ASTM, 2008).

1.3.2.2. Análisis de flamabilidad

El poliuretano es el aislante térmico más eficaz que existe de todas las espumas formuladas a partir de isocianato, haciéndolo un material ampliamente utilizado en varias industrias, principalmente en el sector de la construcción, por lo que se hace importante evaluar el rendimiento a la llama del material desde el punto de vista de la seguridad contra incendios (Zheng, 2015, pp. 1-3).

El análisis de flamabilidad mide y describe la respuesta de los materiales cuando son expuestos a la llama bajo condiciones controladas, donde se determina la velocidad con la que se puede propagar la llama en el material. Los resultados del análisis de flamabilidad sirven como un indicador preliminar con respecto a las propiedades de combustión.

En la actualidad la materia prima del poliuretano lleva incorporada agentes retardantes a la llama debido a que la espuma de poliuretano es altamente inflamable. Las propiedades de combustión de un material se ven afectadas por factores tales como la densidad, pigmentos, estructura interna y espesor del material. Por lo tanto, para el uso en la industria de un material compuesto de poliuretano con fibra natural, es conveniente investigar el efecto que se presenta sobre la retardación al fuego (Singh y Jain, 2009, pp. 1115-1121).

Para determinar el comportamiento que posee el material cuando es expuesto a la llama, se utiliza como parámetro de medida a la velocidad lineal de combustión. La velocidad lineal de combustión indica el alcance que tiene la llama en un determinado tiempo y se expresa con la Fórmula 1.1:

$$V = \frac{60L}{t} \quad [1.4]$$

Donde:

V es la velocidad lineal de combustión (mm/min)

L es la longitud de combustión (mm)

t es el tiempo de combustión (s)

1.3.2.3. Análisis de las propiedades térmicas

La conductividad térmica es una propiedad importante en la aplicación y uso de las espumas. Entendiéndose por conductividad térmica a la capacidad de cada material para transferir energía (calor) a través de un área unitaria cuando el gradiente de temperatura es la unidad. La conductividad térmica depende de la densidad, porosidad del material y morfología de la matriz polimérica.

Para analizar las propiedades térmicas de un material celular, se realiza una evaluación del transporte de energía de una región a otra bajo la influencia de un

gradiente de temperatura. Se emplea un equipo medidor de calor que establece un estado estable de flujo de calor unidireccional, donde se transfiere energía a través de una muestra que se encuentra entre dos placas paralelas de cobre a temperaturas constantes pero diferentes, tal como lo muestra la Figura 1.8 (Almanza, Rodríguez, y De Saja, 2004, pp. 1226-122).

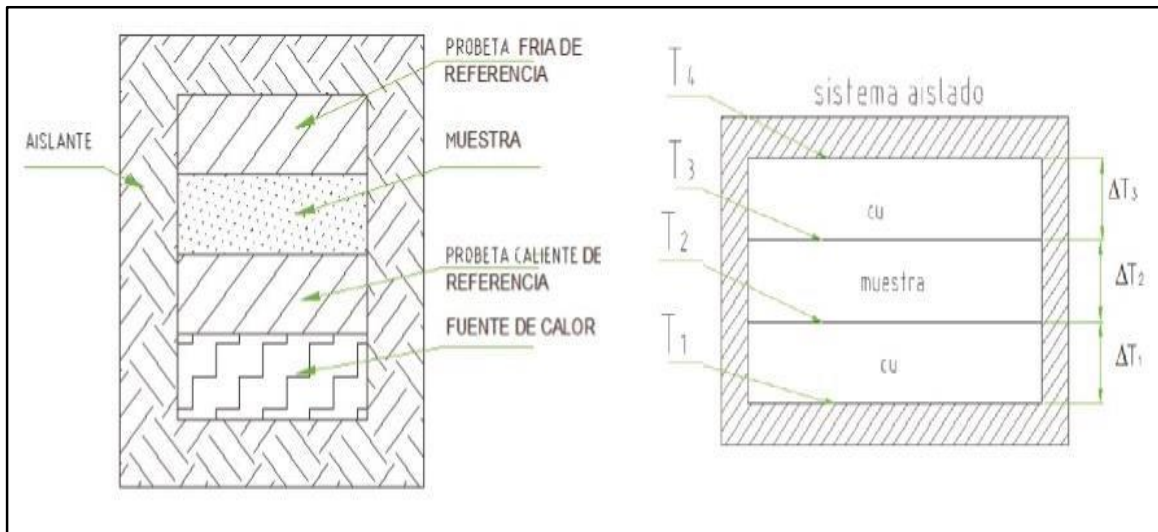


Figura 1.8. Esquema de la configuración del equipo
(Barba y Tituana, 2014, p. 9 y p. 23)

La transferencia de calor por conducción es la transferencia de energía desde una zona de alta temperatura a una zona de baja temperatura de una sustancia (líquida, sólida, gaseosa), o entre sustancias que estén en directo contacto físico. Para cuantificar el proceso de conducción de calor unidimensional se utiliza la ley de Fourier:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad [1.5]$$

Donde:

q_x es la velocidad de transferencia de calor en la dirección x (W)

k es la conductividad térmica propia del material (W/m*K)

A es el área perpendicular a la dirección de transferencia (m²)

dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x

Para condiciones de estado estable unidireccional, el gradiente de temperatura se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad [1.6]$$

Si se suministra una potencia eléctrica, esto equivale al calor que ingresa al sistema. Y el calor que ingresa al sistema es igual a calor que se transfiere entre cada placa y entre la muestra, como se muestra en la Figura 1.9:

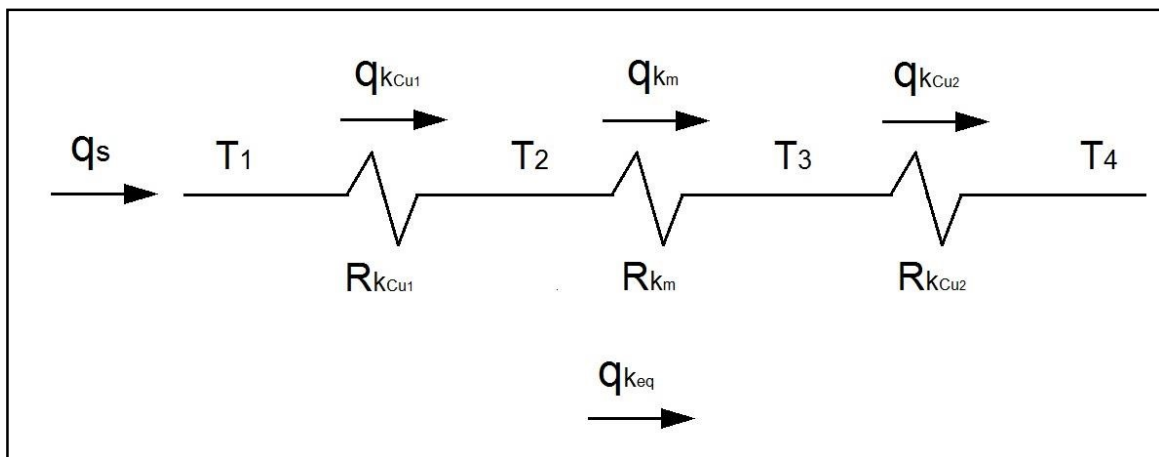


Figura 1.9. Flujo de calor disipado por el sistema de placas
(Barba y Tituana, 2014, p. 14)

$$P = q_s = q_{k_{Cu1}} = q_{k_m} = q_{k_{Cu2}} \quad [1.7]$$

$$P = q_s = \frac{k_{Cu}A(T_1 - T_2)}{L_{Cu}} = \frac{k_M A(T_2 - T_3)}{L_M} = \frac{k_{Cu}A(T_3 - T_4)}{L_{Cu}} \quad [1.8]$$

Donde:

P es la potencia eléctrica que se suministra al sistema (W)

q_s es el calor que ingresa al sistema (W)

L es el espesor de las placas

En el análisis térmico se realizaron las siguientes consideraciones: transferencia de calor por conducción en sentido unidireccional, las placas están en contacto perfecto, no existe generación de energía interna, la conductividad térmica es constante, la temperatura es constante en las placas a un determinado tiempo y se trata de un sistema aislado donde se desprecia las pérdidas por convección y radiación (Incropera y de Witt, 2007, pp. 74-79).

$$P = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_{Cu}}{k_{Cu} * A} + \frac{L_M}{k_M * A} + \frac{L_{Cu}}{k_{Cu} * A}} \quad [1.9]$$

En la práctica, para calcular la constante de conductividad térmica de la muestra se prefiere que el área transversal de contacto y el espesor de las placas sean iguales. Con lo que despejando la fórmula anterior, se obtiene:

$$k_M = \frac{P * L * k_{Cu}}{k_{Cu} * A * \Delta T - 2 * P * L} \quad [1.10]$$

1.3.2.4. Análisis de las propiedades acústicas

Se entiende por sonido a la variación de la presión sobre la presión atmosférica que es producido por un conjunto de vibraciones la cuales propagan en diferentes medios (sólido, líquido y gaseoso). La intensidad del sonido normalmente se mide en una unidad llamada decibelio (dB), relacionando el logaritmo de una cantidad media con una de referencia. Se entiende por frecuencia al número de veces en que la onda sonora repite el cambio de presión en un segundo, se expresa en hertzios (Hz). Período es el tiempo que para que se complete un ciclo de la onda acústica. La longitud de onda es la distancia recorrida por una onda acústica en un período completo, se expresa en metros. Los sonidos en bajas frecuencias presentan longitudes de onda largas, por lo que son difíciles de receptor y de aislar (Rojo, 2005, pp. 581-584). En la Figura 1.10 se ilustra la frecuencia, período y longitud de onda.

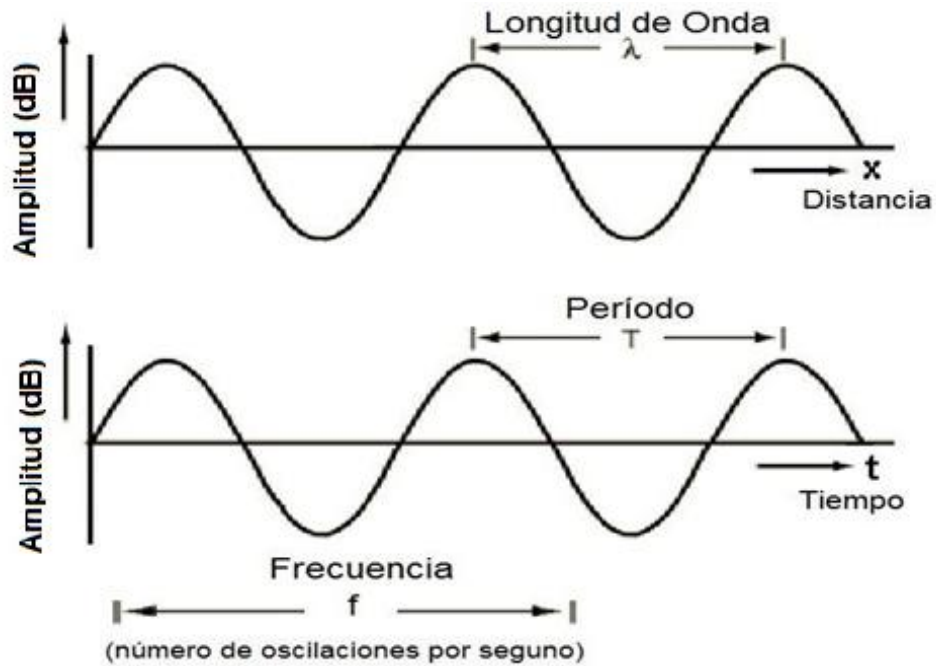


Figura 1.10. Frecuencia, período y longitud de onda de un sonido
(Lamancusa, 2010, p. 92)

Se define como presión acústica a la energía acústica por unidad de superficie, es decir al cambio de presión que se da en el medio debido a una onda sonora a través del aire. Como el margen de variación de presión acústica es muy amplio, se utiliza como unidad de medida el nivel de presión acústica (L_p), donde se toma como referencia el menor nivel presión sonora que el oído puede detectar, se define mediante la expresión:

$$L_p = 20 \log (P / P_o) \quad [1.11]$$

Donde:

L_p es el nivel de presión acústica expresada en decibelios (dB).

P es presión acústica medida.

P_o es la presión acústica de referencia ($2 * 10^5$ N/m²).

El nivel de presión acústica se mide en un rango de frecuencia que varía entre 20 y 20 000 Hz (rango de frecuencia que puede ser receptada por el oído humano), dicho rango se subdivide en grupos de frecuencias llamados bandas de octava.

Para medir el nivel de presión sonora se utiliza sonómetros, que son instrumentos electrónicos capaces de medir el nivel de sonido en bandas de octava ya que poseen filtros electrónicos que receptan sonidos solamente de una determinada frecuencia y dejan pasar el resto de sonidos (Rojo, 2005, pp. 591-598).

El control de ruido implica tres tipos de energía: incidente, transmitida y reflejada, las cuales se desplazan por el aire y la pantalla aislante. Cuando el ruido golpea la pantalla aislante, la cual se encuentra entre dos habitaciones, una parte de la energía es transmitida y la otra parte es reflejada, tal como se muestra en la Figura 1.11.

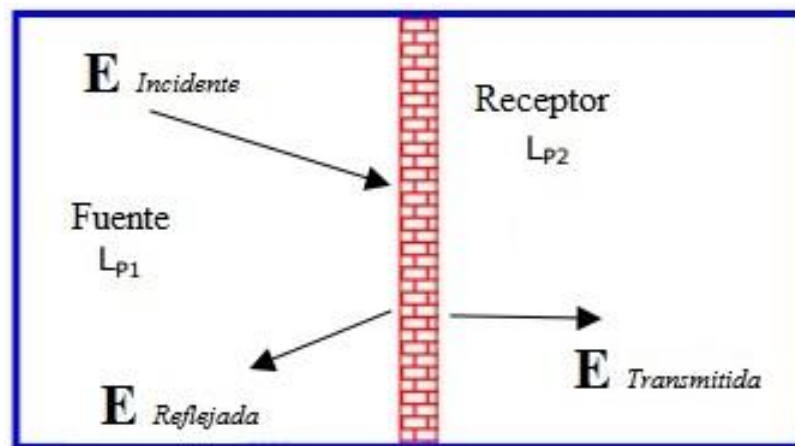


Figura 1.11. Transmisión del sonido entre dos habitaciones divididas por una pantalla aislante

(Lamancusa, 2010, p. 91, imagen traducida)

El confinamiento o encabinamiento es una técnica que se utiliza para atenuar la emisión de ruido, consiste en rodear la fuente sonora herméticamente con un material que tiene como objetivo rebajar el nivel de ruido. Estos materiales son colocados entre el foco emisor y el medio que se desea aislar para que de esta manera se logre disminuir la energía que atraviesa los materiales (Giménez, 2013, p. 151).

Para realizar el análisis de las propiedades acústicas de materiales se necesita determinar la pérdida por transmisión del material. La pérdida por transmisión es el nivel de presión acústica transmitido a través de la pantalla aislante, e indica la reducción del nivel de ruido que consigue un material cuando lo atraviesa una onda

sonora. La pérdida por transmisión depende de la frecuencia del sonido y, de las características de material aislante, como por ejemplo: peso superficial y espesor. El peso superficial se refiere a la masa del material por unidad de superficie.

La pérdida por transmisión (TL) se expresa en dB y se la obtiene con la siguiente fórmula:

$$TL = L_{p \text{ fuente}} - L_{p \text{ confinado}} \quad [1.12]$$

Donde:

$L_{p \text{ fuente}}$ es el nivel de presión acústica de la fuente sonora, expresado en (dB).

$L_{p \text{ confinado}}$ es el nivel de presión acústica de la fuente realizado el confinamiento con el material, expresado en (dB).

Existe una manera de calcular la pérdida por transmisión con base en las propiedades físicas del material (Rojo, 2005, pp. 591-598), se utiliza la fórmula:

$$(TL)_{\text{calculada}} = 20 \log (f * M) - 47 \quad [1.13]$$

Donde:

f es la respectiva frecuencia de las bandas de octava, expresada en (Hz).

M es el peso superficial, se expresa en (kg/m²)

2. PARTE EXPERIMENTAL

Para la realización de este proyecto, se tomaron en cuenta inicialmente cuatro tipos de fibras: cabuya, bagazo de caña de azúcar, raquis de palma africana y abacá. De las cuatro fibras antes mencionadas, se eligieron la fibra de cabuya y la de raquis de palma africana para desarrollar el material compuesto con matriz de poliuretano rígido. Los análisis para la selección de las fibras de cabuya y de raquis de palma africana se encuentran explicados en el punto 3.

2.1. FORMULACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE POLIURETANO CON FIBRA DE CABUYA CON Y SIN MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA

2.1.1. PREPARACIÓN FÍSICA DE LA FIBRA DE CABUYA

Se empleó fibra de cabuya proveniente de la provincia de Imbabura. La fibra utilizada es una mezcla de dos variedades: Uña de águila y Ceniza, en ambas variedades las hojas son de color verde en la parte superior y de color gris en la parte inferior, la diferencia radica en que la primera especie presente espinas encorvadas. No es posible determinar el tipo de fibra que se utilizó, debido a que la mezcla de fibras se origina en las mismas comunidades productoras.

De la fibra de cabuya obtenida, se separaron las impurezas y polvos de la materia prima en forma manual. Para facilitar el ingreso de las fibras al molino, con la ayuda de una tijera, las fibras fueron reducidas de tamaño, en segmentos de 4 cm. En la Figura 2.1 se muestra la fibra de cabuya que se usó para el presente proyecto.

Las fibras primero fueron sometidas a un proceso de molienda. La fibra fue introducida en la tolva de alimentación del molino de cuchillas Thomas-Wiley del Centro Textil Politécnico. La fibra fue molida en dos ocasiones para incrementar la

eficiencia del proceso, la primera vez se usó la malla metálica con agujeros de 2 mm de diámetro y la segunda vez se usó la malla de 1 mm de diámetro.

Con base en el estudio de El-Shekeil et al., (2012) quien trabajó con fibras cuyo tamaño de partícula se encontraban dentro de un rango de malla entre 50-120 (p. 1437), para el presente proyecto se usaron tamices de mallas #20, #30, #50 y #60. Las fibras fueron tamizadas durante 30 minutos en el tamizador marca Humboldt perteneciente al CIAP (Centro de Investigaciones Aplicadas a los Polímeros). Al tomar en cuenta el criterio de Badri, quien concluye que al trabajar con fibras de menor tamaño de partícula se logran mejores resultados debido a que se incrementa la superficie de contacto con la matriz, en el presente proyecto se utilizaron las fibras que pasen la malla #60. (Badri, Mat Amin, Othman, Manaf y Khalid, 2006, p. 195).



Figura 2.1. a) Fibra de raquis de palma africana, b) fibra de cabuya

Dado que el exceso de agua en la reacción para la formación de poliuretano, produce irregularidades en las celdas que afectan a la estabilidad dimensional del producto, se procedió a eliminar la humedad de las fibras mediante un proceso de secado. Las fibras seleccionadas en función de su tamaño de partícula, fueron secadas durante 4 horas a una temperatura de 105°C (Bledzki et al., 2005, p. 2406) en la estufa de marca MMM Group.

2.1.2. PRE PARACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE CABUYA

Se realizó un tratamiento químico de acetilación a la fibra, con dos objetivos: el primero es aumentar la naturaleza hidrofóbica de la fibra y el segundo es hacer más lisa la superficie de la fibra, con la finalidad de mejorar la interacción entre la matriz polimérica y las fibras.

Se usó anhídrido acético con 97% de pureza de la casa comercial British Drug Houses LTDA., como agente acetilante. Se colocaron las fibras en un reactor de vidrio de 1 000 ml de capacidad y se añadió anhídrido acético hasta que las fibras estén totalmente cubiertas. El reactor fue colocado en un baño de aceite a 110 °C con un reflujo condensador durante 120 minutos, como lo muestra la Figura 2.2.

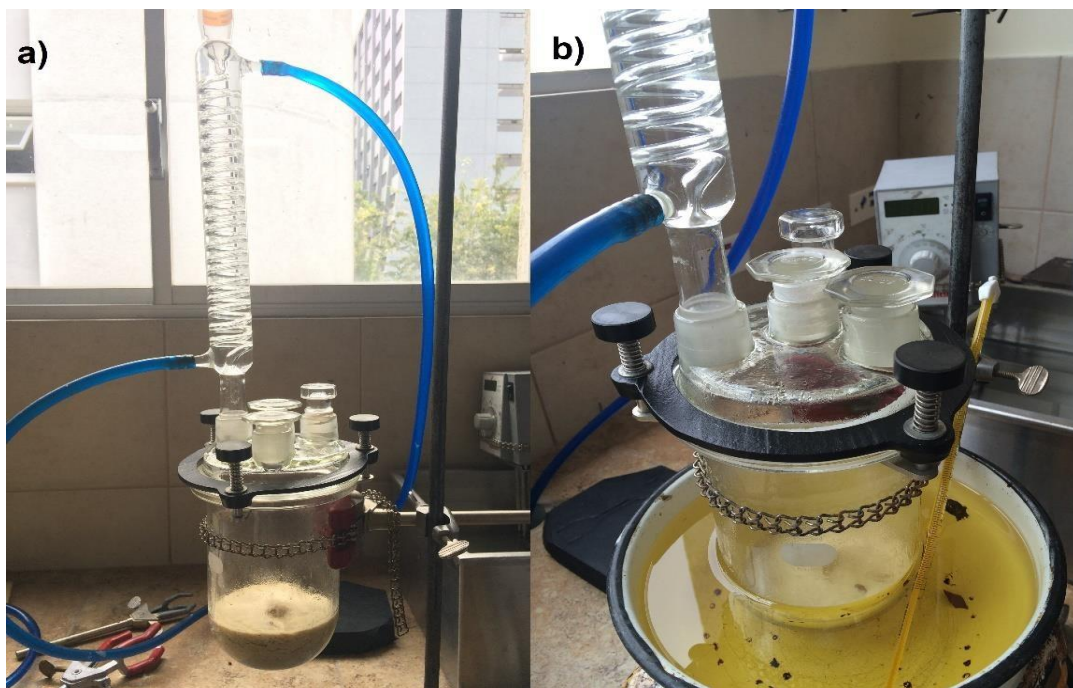


Figura 2.2. a) Proceso de acetilación, b) baño de aceite

Al finalizar el tiempo, el reactor fue retirado del baño de aceite y las fibras fueron extraídas del reactor. Las fibras fueron lavadas con agua destilada y luego secadas a 105°C durante 8 horas (Mohebbi y Hajihassani, 2010, p. 158; Hill, C., y Abdul K., 2000, p. 1686).

2.2. FORMULACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE POLIURETANO CON FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA CON Y SIN MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA

2.2.1. PREPARACIÓN FÍSICA DE LA FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA

La fibra de raquis de palma africana utilizada fue recolectada de la planta extractora de aceite “Rio Manso”, propiedad de la Corporación Favorita, localizada en el cantón Buena Fe en el kilómetro 41 vía a Quevedo en la provincia de Los Ríos. La fibra de raquis de palma africana se obtiene del racimo vacío que se recolecta del proceso de extracción del aceite de palma.

La fibra fue secada a temperatura ambiente durante tres días para evitar el crecimiento de hongos en la fibra. Luego, se procedió a limpiar las impurezas propias de la planta en forma manual. La fibra de raquis fue obtenida de la parte central del racimo. Para facilitar el ingreso de las fibras al molino, con la ayuda de una tijera, las fibras fueron reducidas de tamaño, en fragmentos de 1 cm. En la Figura 2.1 se muestran las fibras que se usaron para el presente proyecto.

La fibra de raquis de palma africana fue sometida a los procesos de: molienda, tamizado y secado. Las condiciones con las que se realizó la preparación física de la fibra de raquis de palma africana y los equipos, son los mismos con los que se realizó la preparación física la fibra de la cabuya detallada en el punto 2.1.1.

2.2.2. PREPARACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA

Se realizó a las fibras de raquis de palma africana el tratamiento químico descrito en el punto 2.1.2. El tratamiento de acetilación fue realizado con el objetivo de mejorar la afinidad entre la matriz polimérica y la fibra. El esquema de la acetilación se muestra en la Figura 2.2.

2.2.3. SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE PROCESAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO CON FIBRA DE CABUYA Y CON RAQUIS DE PALMA AFRICANA

Se realizaron pruebas experimentales en las cuales se definieron las condiciones de trabajo con las que se elaborará adecuadamente el material compuesto. Se variaron: la temperatura del molde, el tiempo de moldeo y la relación en peso de polioliol:isocianato. Para definir la temperatura del molde se probaron con 40°C, 50°C y 60°C. Se eligió la temperatura con la cual el material tenga la forma completa del molde y no presente fallas superficiales (Huntsman, 2007, p.2).

Para definir el tiempo de moldeo se experimentó con tres tiempos: 10,0, 12,5 y 15,0 minutos. El tiempo de moldeo depende del espesor de la espuma y de las dimensiones de la misma. Se seleccionó el tiempo con base en la estabilidad dimensional que presentó el material, es decir, el material no debía contraerse, pandearse ni perder su forma (Huntsman, 2007, p.2).

Finalmente, se ensayaron con tres distintas relaciones en peso de polioliol:isocianato: 1:1, 1:1,1 y 1:1,2. Se seleccionó la relación con la que el material compuesto haya presentado una buena apariencia, es decir, el material no debía presentar burbujas ni cualquier otro tipo de defecto superficial. Además la agitación de los componentes se realizó a 2 000 rpm durante 6 segundos por recomendación de la hoja técnica (Huntsman, 2007, p.1).

2.2.4. PREPARACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO CON FIBRA DE CABUYA Y CON RAQUIS DE PALMA AFRICANA

Los constituyentes del material compuesto fueron: matriz de poliuretano rígido, fibras de cabuya ó raquis de palma africana. Se desarrollaron cuatro tipos de materiales compuestos: el primero fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya, el segundo fue un material de matriz de poliuretano

rígido reforzado con fibra de cabuya químicamente tratada, el tercero fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de raquis de palma africana y el cuarto fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de raquis de palma africana químicamente tratada.

Como materia prima del poliuretano rígido se utilizó: difenilmetano diisocianato y polioliol polioxipropilénico, materiales fabricados por la empresa Huntsman:

- **Difenilmetano diisocianato (MDI):** Es utilizado en la producción de espuma de poliuretano rígida. Se presenta en una forma de líquido viscoso oscuro.
- **Polioliol polioxipropilénico:** Se encuentra formulado con catalizadores, tensoactivos, agentes soplantes y retardantes a la llama, apto para la elaboración de paneles de poliuretano rígido. Este material está diseñado para ser procesado a alturas que sobrepasen los 1 000 m sobre el nivel del mar.

La preparación del material compuesto, se realizó mediante moldeo manual, donde se añade manualmente las materias primas en un molde y así el producto toma su respectiva forma. El molde debe tener un sellado óptimo para asegurar que no se formen rebabas. Para el proyecto se usó un molde rectangular de metal de 15 cm x 20 cm x 1,25 cm. Antes de añadir los componentes, se aplicó desmoldante por todas las paredes internas del molde, en este proyecto se utilizó parafina líquida.

Primero se pesaron el polioliol e isocianato, en una balanza Metter Toledo con una precisión de 0,01 gramos, en distintos recipientes. La relación en peso polioliol:isocianato es analizada en el capítulo 3 y determinada en el punto 3.2.2.1. La fibra natural, con el respectivo porcentaje en peso, fue añadida en el recipiente con polioliol y se batió la mezcla. Luego, se añadió el isocianato y con el uso de un agitador se mezcló para que la fibra se pueda distribuir por todo el contenedor. La mezcla fue vertida en el molde que fue previamente calentado a la temperatura seleccionada en el punto 3.2.2.2., y se procedió a cerrarlo. Por último, se esperó el respectivo tiempo de desmolde para abrir el molde y sacar el material compuesto.

Las variables con las que se trabajó en el proyecto fueron: el tipo de fibra, la concentración de carga en peso de la fibra en el material compuesto y el

tratamiento químico a las fibras. Raquis de palma africana y cabuya fueron los dos tipos de fibra que se utilizaron. Con base en el análisis que se realizó en el punto 3.2.3, para cada una de las fibras se trabajaron con tres valores de concentración de carga en peso: 5%, 10% y 15%. Respecto al tratamiento químico a las fibras se tuvo: material compuesto con fibras sin tratamiento químico y material compuesto con fibras químicamente tratadas. En la Tabla 2.1 se detallan las variables y sus respectivos niveles para el desarrollo del material compuesto de matriz de poliuretano rígido.

Tabla 2.1. Variables y niveles para el desarrollo del material compuesto de matriz de poliuretano rígido

Material compuesto	Variables	Niveles
Matriz de poliuretano rígido con fibra natural	Tipo de fibra	Raquis de palma africana
		Cabuya
	Porcentaje en peso de la fibra	5%
		10%
		15%
	Tratamiento a la fibra	Sin tratamiento químico
		Con tratamiento químico (acetilación)

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

2.3.1. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Para los ensayos mecánicos se utilizó la máquina de ensayos universales para propiedades mecánicas marca Instron modelo 1011 localizado en el CIAP, en la Figura 2.3 se muestra el esquema de los ensayos de flexión y de tracción.

Los materiales compuestos a los que se determinaron las propiedades mecánicas se encuentran detallados en la Tabla 2.1. Se trata de 12 distintos tipos de materiales compuestos. Además se evaluaron las propiedades mecánicas del material hecho únicamente de poliuretano. Para cada uno de los ensayos se

utilizaron cinco probetas válidas, tal como lo exige la norma. Las probetas se obtuvieron de cinco diferentes planchas y se las cortaron con la ayuda de una cuchilla.

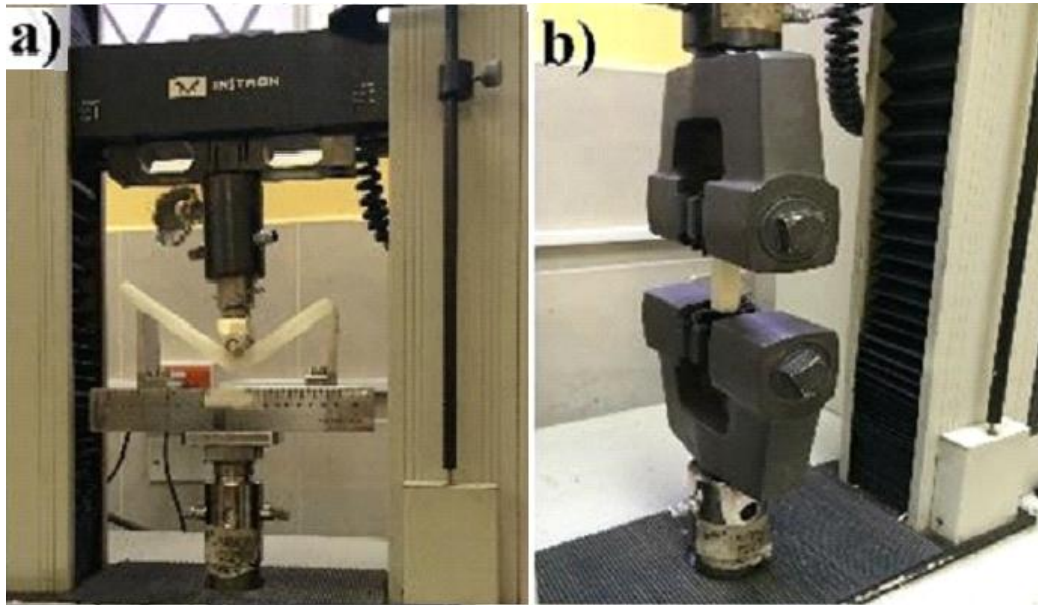


Figura 2.3. a) Accesorios para ensayo de flexión, b) accesorios para ensayo de tracción

2.3.1.1. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se realizó según la norma ASTM D7264: Pruebas estándar para propiedades de flexión para materiales compuestos con matriz polimérica (ASTM D7264, 2007, p. 1). Las condiciones con las que se realizaron los ensayos están detallados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Condiciones de trabajo para los ensayos de flexión

Parámetro	Valor
Razón de la muestra	1 pt/s
Velocidad	1 mm/min
Relación span:espesor	16:1
Carga de la celda	500 N

Para el ensayo de flexión las probetas fueron de las siguientes dimensiones:
Largo: 200 mm, espesor: 12 mm y ancho: 10 mm.

2.3.1.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó según la norma ASTM D3039: Pruebas estándar para propiedades de tracción para materiales compuestos con matriz polimérica (ASTM D3039, 2014, p. 1). Las condiciones con las que se realizaron los ensayos están detallados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Condiciones de trabajo para los ensayos de tracción

Parámetro	Valor
Razón de la muestra	5 pts/s
Velocidad	5 mm/min
Distancia entre mordazas	6 cm
Carga de la celda	500 N

Para el ensayo de tracción las probetas fueron de las siguientes dimensiones:
Largo: 100 mm, ancho: 10 mm y espesor: 12 mm.

2.3.1.3. Selección de los materiales compuestos

Posteriormente a la determinación de las propiedades mecánicas, se seleccionaron cuatro tipos de materiales compuestos cuyo porcentaje en peso de fibra presenten mayores o iguales resultados que el material hecho únicamente de poliuretano en los parámetros de resistencia a la flexión, módulo de Young y módulo de flexión: dos materiales de cabuya (con y sin tratamiento químico) y dos materiales de raquis de palma africana (con y sin tratamiento químico). A estos cuatro tipos de materiales se realizaron las pruebas de densidad y flamabilidad, y la evaluación de las propiedades térmicas y acústicas.

2.3.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y FLAMABILIDAD

En la sección 3.3.1.3 se seleccionaron cuatro materiales compuestos, cuyos resultados se explican en las secciones 3.3.1.1 y 3.3.1.2. Para éstos materiales y para el material hecho sólo de poliuretano, se determinaron las propiedades de densidad y flamabilidad.

2.3.2.1. Ensayo de densidad

Se determinó la densidad según la norma ASTM D1622: Densidad de plásticos rígidos (ASTM D1622, 2012, p. 1). Para pesar las probetas se utilizó la balanza analítica marca Denver Instrument Company modelo AA-200 con una precisión de 0,0001 gramos. Se realizaron 3 repeticiones conforme exige la norma.

2.3.2.2. Análisis de flamabilidad

El ensayo de flamabilidad se realizó según la norma ASTM D635: Velocidad de combustión para plásticos en posición horizontal (ASTM D635, 2012, p. 1). Las condiciones de trabajo para este ensayo se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Condiciones de trabajo para el ensayo de flamabilidad

Parámetro	Valor
Altura de la llama	20 mm
Ángulo de la llama	45°
Longitud de la probeta	125 mm
Ancho de la probeta	13 mm

Se realizaron dos marcas a las probetas, la primera a los 25 mm y la segunda a los 100 mm. Las probetas fueron expuestas a la llama de un mechero durante 30 segundos, y permitiendo que la llama alcance sólo los primeros 6 mm de la

probeta. Si en los 30 segundos la llama no alcanza la primera marca (25 mm), la velocidad de combustión es nula. Si la llama alcanzó la marca de los 25 mm (dentro del rango de exposición de los 30 segundos), se retira el mechero y se inicia el tiempo a cronometrar. Se registró la distancia alcanzada por la llama y se anotó el tiempo transcurrido desde que se retiró el mechero. Para el ensayo se hicieron 10 repeticiones conforme exige la norma.

2.3.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y ACÚSTICAS

A los cuatro materiales seleccionados en la sección 3.3.1.3, se evaluaron las propiedades térmicas y acústicas. Dichas pruebas también se realizaron al material hecho sólo de poliuretano.

2.3.3.1. Análisis de las propiedades térmicas

Para evaluar las propiedades térmicas del material se determinó el coeficiente de conductividad térmica según la norma ASTM C518: Transmisión de propiedades térmicas en estado estacionario (ASTM C518, 2010, p. 1). Las condiciones de trabajo para este ensayo se detallan en la Tabla 2.5. El análisis de las propiedades térmicas fue para determinar la variación del coeficiente de conductividad térmica del material compuesto con respecto al coeficiente del poliuretano, para así determinar si el material formulado es apto para la fabricación de planchas para ser usadas como aislante térmico en la industria de la construcción o en tecnología de refrigeración.

Tabla 2.5. Condiciones de trabajo para determinar el coeficiente de conductividad térmica

Parámetro	Valor
Potencia eléctrica	6 W
Diámetro de la probeta	3,5 in
Espesor de la probeta	10 mm

Se utilizó el equipo del laboratorio de transferencia de calor (equipo para transferencia de calor por conducción para materiales no metálicos) de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Se trata de un aparato medidor de calor que establece un estado estacionario de flujo de calor unidireccional a través de una muestra del material entre dos placas paralelas a temperaturas constantes pero diferentes. Con la ayuda de un software se obtuvieron las temperaturas en cada placa cuando el sistema alcanzó el equilibrio. Para este ensayo se realizaron tres repeticiones.

2.3.3.2. Análisis de las propiedades acústicas

Para evaluar las propiedades acústicas se siguieron las disposiciones de la Resolución No 002-SA-2014: Normas Técnicas de Calidad Ambiental, Emisiones, Descargas y Vertidos para el DMQ (Resolución No 002, 2014, pp. 38-45). El poliuretano rígido al ser un material poroso que permite el paso del aire también permite el paso del sonido y por ende no puede tener buenas propiedades de aislante acústico, no obstante, mediante la formulación con fibras naturales se buscó determinar si el material desarrollado es útil para el aislamiento acústico, con lo que puede ser utilizado para en la industria de la construcción.

Se usó una fuente fija emisora de sonido para producir un ruido estable y con la ayuda de un sonómetro integrador-promediador marca Cirrus modelo 161C se determinó el nivel de presión sonora continuo equivalente en bandas de octava en cuatro puntos distintos alrededor de la fuente (con y sin confinamiento). Como fuente de ruido se utilizó parlantes de la marca Genius de una potencia de 320 W.

Mediante el confinamiento de la fuente de ruido, se compararon las pérdidas por transmisión de los distintos tipos de materiales. Para confinar la fuente emisora de ruido se utilizó una cabina hecha de: material de poliuretano, material compuesto de poliuretano con fibra de cabuya (con y sin tratamiento químico) y material compuesto de poliuretano con fibra de raquis de palma africana (con y sin tratamiento químico). En la Figura 2.4 se observa el esquema que se utilizó para

realizar el análisis de las propiedades acústicas. Las dimensiones de la cabina se encuentran detalladas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Dimensiones de la cabina de confinamiento

Parámetro	Valor
Ancho	215 mm
Alto	160 mm
Profundidad	160 mm
Espesor	12,5 mm

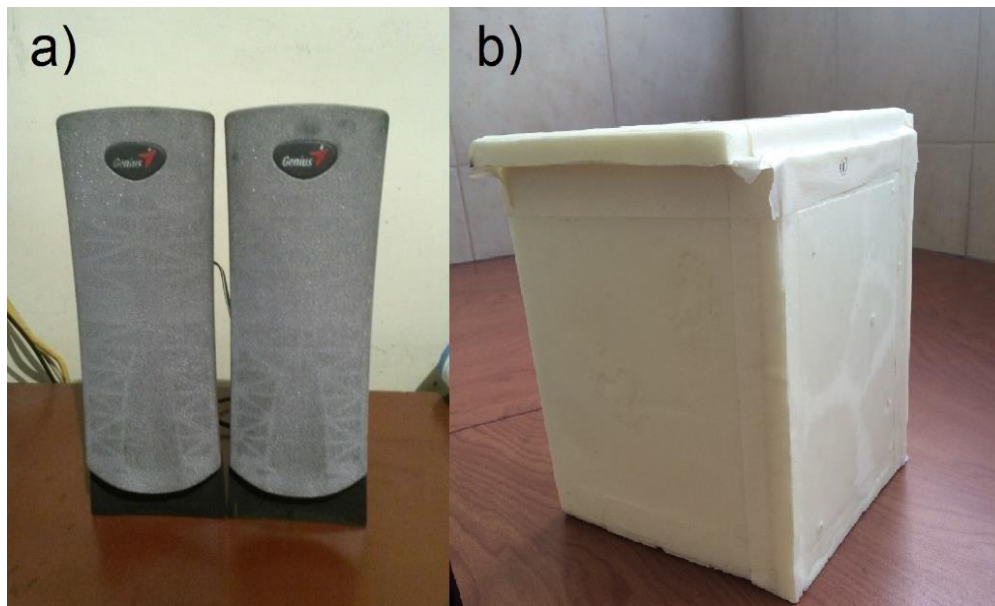


Figura 2.4. a) Fuente de ruido y b) esquema de confinamiento

2.3.3.3. Análisis de costos de producción de un material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya y con raquis de palma africana

Se realizó un análisis de costos de producción de los materiales seleccionados en el punto 3.3.1.3, puesto que para el tratamiento químico se utilizó anhídrido acético, el cual es un reactivo regulado por el CONSEP y tiene un costo en el mercado de \$56 por litro, no se realizó el análisis de costos para los materiales compuestos con

fibra químicamente tratada, ya que uno de los propósitos del presente proyecto es disminuir los costos de producción.

En el análisis realizado no se tomó en cuenta el costo de la inversión fija (terreno y maquinarias) ni el costo de la mano de obra, debido a que el análisis de costos está destinado para una planta que ya cuenta con la infraestructura apropiada para la elaboración de poliuretano rígido. Además, la maquinaria que se utiliza para obtener planchas de poliuretano al 100% es la misma que se utilizará para la producción del material compuesto.

El análisis de costos de producción tiene como finalidad establecer el precio de producción de un lote de 1 000 kg de material compuesto. Para el análisis de costos se consideró:

- El costo de la materia prima para la elaboración de poliuretano rígido (poliol e isocianato)
- El costo de preparación de las fibras en las condiciones óptimas para que ingresen al proceso de producción (transporte, molienda, tamizado y secado).

Sumados estos dos costos se determinó el costo real para producir un lote de 1 000 kg de material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibras. Se comparó el costo de producción del material compuesto con el costo de producción del material hecho sólo de poliuretano y, se determinó la ganancia económica por el uso de fibras naturales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las cuatro fibras consideradas inicialmente para el presente proyecto (cabuya, bagazo de caña de azúcar, raquis de palma africana y abacá), se seleccionaron dos con base en la facilidad de procesamiento para la obtención del material compuesto y del aspecto final que presentaban las planchas elaboradas.

Se descartó la fibra de bagazo de caña de azúcar porque al elaborar el material compuesto con 15% de porcentaje en peso de fibra se dificultaba el proceso de mezclado. Se obtuvo un producto defectuoso ya que la dificultad en el proceso de mezclado no permitió que se lleve a cabo la reacción completa de las materias primas de la matriz polimérica. Con el resto de fibras no hubo problema al elaborar el material compuesto con 15% de carga de fibra. La dificultad de procesamiento que presentó el bagazo de caña de azúcar para trabajar con porcentajes mayores o igual al 15% en peso se debe a la baja densidad que posee esta fibra, por lo tanto se excluyó dicha fibra para el proyecto.

Cuando se utilizó fibra de abacá, el procesamiento de la fibra no presentó dificultad y se obtuvieron planchas con un buen aspecto visual. Sin embargo, se decidió no trabajar con la fibra de abacá por el alto costo que ésta representa en relación con el resto de fibras. Además existen varios estudios de materiales compuestos reforzados con fibra de abacá, por lo que no representaba un material compuesto de innovación para el desarrollo del presente proyecto.

Cuando se desarrolló el material compuesto con fibra de cabuya, no existieron problemas en el mezclado con las materias primas. El producto resultante no presentó fallas que afecten su estética. Además el color de la fibra de cabuya era similar al de las planchas de poliuretano, por lo que el color del material compuesto era muy similar al color del material puro.

Cuando se elaboró el material compuesto con 15% de carga de raquis de palma africana no se presentaron inconvenientes. El proceso de mezclado de raquis de

palma africana con la materia prima del poliuretano fue exitoso, obteniéndose un material compuesto con buen aspecto visual pero de un color más oscuro debido a la pigmentación propia de la fibra.

Por lo tanto, para el presente proyecto se desarrollaron materiales compuestos de matriz poliuretano rígido para usar como carga fibra de cabuya y raquis de palma africana.

3.1. FORMULACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO REFORZADO CON FIBRA DE CABUYA CON Y SIN MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA

3.1.1. RESULTADOS DE LA PREPARACIÓN FÍSICA DE LA FIBRA DE CABUYA

La obtención de la fibra de cabuya no implicó dificultades, ya que se la adquirió en un mercado artesanal de la ciudad de Ibarra. La fibra de cabuya es fácil de encontrar a lo largo de la región Sierra en las comunidades productoras o en mercados artesanales. La fibra adquirida se encontraba lista para trabajar y simplemente se hizo una limpieza superficial.

La fibra de cabuya no presentó problema alguno cuando fue molida. Luego del proceso de molienda y tamizado de la cabuya, se procedió a determinar el tamaño característico de las partículas, es decir, se estableció el número de malla en la cual se quedó retenida la mayor cantidad de fibra. El 40% de la cabuya fue retenida en la malla #50, es decir, el tamaño característico de partícula varía entre 300 y 590 μm . Al tomar en cuenta el criterio de Badri (2006), en el presente proyecto se utilizaron las fibras que pasaron la malla #60, es decir, alrededor de un 33% del total de fibra de cabuya (p. 195).

3.1.2. RESULTADOS DE LA PREPARACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE CABUYA

La fibra de cabuya luego de ser sometidas al proceso de acetilación debía ser lavada con agua destilada. El lavado se lo realizó por tres ocasiones para retirar cualquier residuo de anhídrido acético. El inconveniente que se presentó durante este proceso, fue que con cada lavado que se realizó a las fibras, se producía pérdida del material por lo que se necesitó acetilar mayor cantidad de fibra de la calculada inicialmente.

Tras el proceso de acetilación y secado, mediante un análisis visual las fibras presentaban un color más claro en relación con las fibras que no habían sido tratadas químicamente. Una de las razones por las cuales se realizó el proceso de acetilación fue para hacer más lisa la superficie de la fibra. A pesar de ello al analizar las fibras al tacto no hubo diferencia alguna entre las fibras tratadas químicamente y las fibras sin tratamiento.

3.2. FORMULACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO REFORZADO CON FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA CON Y SIN MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA

3.2.1. RESULTADOS DE LA PREPARACIÓN FÍSICA DE LA FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA

La recolección de la fibra de raquis de palma africana presentó mayor dificultad que para la fibra de cabuya, dado que se la debió recolectar de las plantas extractoras de aceite de palma africana que se encuentran en fincas alejadas de las ciudades, en este caso se necesitó trasladarse a la provincia de Los Ríos. La obtención de la fibra de raquis de palma africana conllevó más trabajo en relación con la obtención de la fibra de cabuya, ya que la remoción de las cortezas e impurezas del raquis presentó mayor complejidad debido a la dureza de la planta.

Además la fibra debe almacenarse en lugares libre de humedad para evitar el crecimiento de hongos en la fibra.

Para la fibra de raquis de palma africana luego del proceso de molienda y tamizado, se procedió a determinar el tamaño característico de las partículas. Alrededor del 45% del total de fibra fue retenida en la malla #50, y se determinó que el tamaño característico de la fibra de raquis de palma africana varía entre 300 y 590 μm . Con base en el criterio de Badri (2006) se trabajó con fibras que pasaron la malla #60, que fue un 40% del total de fibra de raquis de palma africana (p. 195).

3.2.2. RESULTADOS DE LA PREPARACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA

Como producto del lavado que debe realizarse al raquis de palma africana con agua destilada luego del tratamiento químico, se presentó pérdida de fibra por lo que se necesitó realizar el tratamiento químico a mayor cantidad de fibra de la calculada inicialmente.

La diferencia visual entre raquis de palma africana tratada químicamente era más evidente que con la fibra de cabuya. Esto es porque el raquis de palma africana acetilado presentaba un color mucho más claro en comparación con el raquis no acetilado. Al realizar un análisis al tacto a las fibras de raquis de palma africana tratadas químicamente, no se presentaron diferencias con el raquis sin tratamiento químico.

3.2.3. SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE PROCESAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO CON FIBRA DE CABUYA Y RAQUIS DE PALMA AFRICANA

En esta sección se analizó de forma cualitativa a los parámetros con los que se trabajó para la elaboración del material compuesto de matriz de poliuretano rígido

reforzado con fibra de cabuya y con raquis de palma africana. Se explican las dificultades o facilidades del proceso de obtención del material compuesto y del aspecto visual que presente el producto final con base en la variación de las condiciones de trabajo.

Los parámetros que se variaron en el presente proyecto fueron: la temperatura del molde, el tiempo de moldeo y la relación en peso de polioliol e isocianato, se variaron sus valores con el fin de obtener un material compuesto con buena estabilidad dimensional, sin fallas superficiales y con la forma adecuada del molde.

3.2.3.1. Relación en peso polioliol:isocianato

Se utilizó un molde rectangular de metal cuyo volumen total fue de 375 cm³. Con base en el valor de densidad del poliuretano de 40 kg/m³ dado en la hoja técnica del producto (Huntsman, 2007, p.1), se calculó la cantidad de materia prima que se necesita para la elaboración del material. Se obtuvo que la cantidad de materia requerida de cada uno de los componentes es de 15 gramos para la elaboración de planchas de poliuretano.

La hoja técnica del producto indica que la relación de mezclado en peso de polioliol:isocianato es de 1:1. Se probó con dicho valor y se obtuvieron planchas que tenían un acabado superficial aceptable pero eran blandas y, no presentaban la rigidez característica del poliuretano rígido. Además se observó que los materiales formulados con esta relación en peso no poseían estabilidad dimensional. Entendiéndose por estabilidad dimensional a la capacidad del material para mantener su respectiva forma con el transcurso del tiempo (Huntsman, 2007, p.2).

Más adelante se probó con una relación de mezclado en peso igual a 1:1,1 (polioliol:isocianato). Las planchas mejoran en su rigidez e incluso presentaban un mejor acabado superficial. Por último se experimentó con una relación en peso polioliol:isocianato de 1:1,2, donde se obtuvo una plancha mucho más rígida y con un mejor aspecto superficial.

Se decidió trabajar con una relación de 1:1,1 debido a que se obtiene un producto estéticamente agradable, que no se dobla con facilidad al aplicar una fuerza y con una adecuada estabilidad dimensional. De esta manera se evita trabajar con una relación 1:1,2 en donde se gasta más materia prima y consecuentemente aumentará los costos de producción del material.

3.2.3.2. Temperatura del molde

Para definir la temperatura del molde con la que se trabajó para la obtención del material compuesto, se probaron con tres distintas temperaturas: 40°C, 50°C y 60°C. Según la hoja técnica del producto, indica que para la obtención de una plancha de poliuretano rígido las paredes del molde deben estar a una temperatura entre 35-40 °C. Se trabajó con un tiempo de moldeo de 20 minutos, por recomendación de la hoja técnica (Huntsman, 2007, p.2).

Cuando se trabajó con una temperatura del molde de 40°C se obtuvieron malos resultados. El producto obtenido era de mala calidad, no tenía la forma completa del molde y se observaban burbujas muy grandes en la superficie del material compuesto. Con 50°C como temperatura del molde, se obtuvieron resultados favorables porque el material tenía la forma completa del molde y a nivel superficial no presentaba fallas. Por último se trabajó con una temperatura de molde de 60°C, con esta temperatura se obtuvieron los mejores resultados (forma completa del molde y sin burbujas), resultados similares conseguidos con una temperatura de 50°C. Los materiales obtenidos con diferentes temperaturas de molde se muestran en la Figura 3.1.

Por lo tanto, la temperatura de las paredes internas del molde con la que se trabajó para la obtención del material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra natural fue de 50°C. Se descartó trabajar con una temperatura de 60°C, ya que esto significaría aumento en los costos de producción y uno de los objetivos

del proyecto es la disminución de gastos en la elaboración de planchas de poliuretano rígido.



Figura 3.1. Material compuesto formulado con diferentes temperaturas de molde a) 40°C, b) 50°C y c) 60°C

3.2.3.3. Tiempo de moldeo

Se ensayaron con tres tiempos de moldeo: 10,0, 12,5 y 15,0 minutos. La hoja técnica del producto indica que el tiempo de moldeo debe variar entre 30 y 40 minutos para planchas de 150 mm de espesor (Huntsman, 2007, p.2). Como para el presente proyecto se obtienen planchas de 12,5 mm de espesor se probaron con tiempos menores recomendados en la hoja técnica.

Cuando se trabajó con un tiempo de 10,0 minutos, al momento de abrir el molde el material estaba todavía blando, y al tratar de sacarlo éste se deformó y quedó impregnado la huella de los dedos o de los instrumentos utilizados para sacar el material compuesto. Esto indica que la polimerización no fue completa y que se debe aumentar el tiempo para que se complete la reacción. También el material carecía de estabilidad dimensional.

Con un tiempo de moldeo de 12,5 minutos el material que se obtuvo es muy poroso, con un muy mal aspecto a nivel superficial. Además, luego de algunos minutos el material compuesto empezó a perder su forma, es decir se empezaba a pandear con pérdida de la forma original del molde.

Finalmente al trabajar con un tiempo de 15,0 minutos el material que se obtiene es más rígido y menos poroso. El material compuesto obtenido poseía estabilidad dimensional, ya que con el pasar de los minutos la plancha no perdió su forma. Por lo tanto, para el desarrollo del material compuesto se trabajó con un tiempo de moldeo 15,0 minutos. No es recomendable aumentar el tiempo debido a que se dificulta el proceso de extracción del material del molde. Los inconvenientes detallados son mostrados en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Fallas debido a los diferentes tiempos de moldeo a) y b) Falta de estabilidad dimensional, c) Porosidad en el acabado superficial

3.2.4. PREPARACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO CON FIBRA DE CABUYA Y RAQUIS DE PALMA AFRICANA

Inicialmente se formularon materiales compuestos con matriz de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana y con fibra de cabuya, utilizando distintos porcentajes en peso de fibra: 5%, 10%, 15% y 20%.

Cuando se formuló al material con 5% y 10% en peso de fibra, no se presentó ningún problema al momento de mezclar los componentes y las planchas obtenidas presentaban un buen aspecto, sin burbujas ni deformaciones. Con 15% de carga en peso se presentó dificultad al momento de agitar la mezcla. A pesar del inconveniente, la reacción entre los componentes del poliuretano se completó debido a que se obtuvieron resultados estéticamente aceptables.

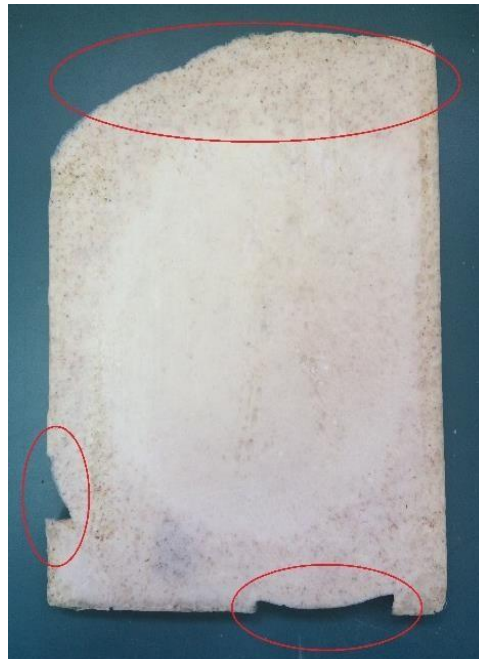


Figura 3.3. Plancha de material compuesto con 20% de carga en peso de fibra

Cuando se formuló un material compuesto con 20% de porcentaje en peso de fibra, se presentaron problemas en la agitación ya que la mezcla era muy densa y era difícil de verter sobre el molde. La reacción de los componentes no se llegó a

dar en su totalidad ya que el material no consiguió llenar todos los espacios del molde. El material obtenido no tenía la forma del molde y presentaba muchas fallas superficiales como burbujas y huecos, como se muestra en la Figura 3.3.

Por lo tanto, las concentraciones de carga en peso de fibra, tanto para el raquis de palma africana como para la cabuya, con los que se desarrolló el material compuesto de matriz poliuretano rígido fueron: 5%, 10% y 15%.



Figura 3.4. Problemas en el material compuesto cuya carga era del 15% de fibra

Para la preparación del material compuesto de matriz de poliuretano reforzado con fibra natural se presentaron inconveniencias al momento de aumentar la concentración de carga en peso de la fibra. El problema más común que se presentaba era el aumento de dificultad al agitar la fibra con las materias primas del poliuretano cuando la concentración de carga era del 15%. Algunas ocasiones el producto no salía totalmente con la forma del molde como lo muestra la Figura 3.4 y, era debido a que la carga de fibra impedía una buena mezcla y no permitía el avance adecuado de la reacción. La mezcla formada era muy viscosa por lo que la presencia de mucha fibra no permitía que se produzca una correcta polimerización. Además el hecho de que la mezcla aumente su viscosidad

dificultaba el proceso de ser vertida sobre el molde y consecuentemente existía mayor desperdicio de materia prima que se quedaba impregnada en el contenedor de mezcla. Dicho problema se presentaba con mayor frecuencia cuando se utilizaba la fibra de cabuya, esto se debe probablemente a que la fibra de cabuya posee mayor densidad que la fibra de raquis de palma africana, tal como se observa en la Tabla 1.2.

Al momento de preparar el material compuesto de matriz de poliuretano con fibra químicamente tratada (acetilación), no hubo ninguna diferencia que cuando se utilizó fibra sin tratar. Se presentaron los mismos inconvenientes en el proceso de mezclado cuando la concentración de carga era del 15%.

Otro problema que se presentaba fue cuando se realizaba una incorrecta agitación. Una agitación a alta velocidad, mayor a 2 000 rpm, ocasionaba la creación de burbujas de aire en la mezcla y consecuentemente dichas burbujas se presentaban en el material compuesto que afectaron su aspecto físico, como se muestra en la Figura 3.1.

Colocar en exceso el desmoldante en las paredes internas del molde es otro de los factores que afectaban el aspecto superficial del material compuesto. Si había exceso de desmoldante el material presentaba fallas en la superficie que se asemejaban a arrugas en la piel.

Por lo tanto, al momento de producir el material compuesto se tomó en cuenta que el material no tenga fallas superficiales como burbujas o huecos, que el material tenga la forma del molde utilizado y que no pierda su forma con el pasar del tiempo. Además se cuidó de no realizar la agitación a grandes velocidades y de no aplicar en exceso el desmoldante.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO FORMULADO

3.3.1. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO FORMULADO

3.3.1.1. Ensayo de flexión

- **Material compuesto con fibra de raquis de palma africana**

Los resultados que se obtuvieron en los ensayos de flexión en el material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana se muestran en la Tabla 3.1. Los parámetros que se analizaron fueron: deformación en el punto de fluencia, esfuerzo máximo y módulo de flexión.

En la Tabla 3.1 se muestran los valores promedios de los parámetros con su respectiva desviación estándar para cada uno de los materiales compuestos de poliuretano rígido con distintas concentraciones en peso de fibra de raquis de palma africana, además se muestran los valores promedios para materiales compuestos con fibra sin tratamiento químico y para materiales compuestos formulados con fibra químicamente tratada. En el Anexo I se presentan los datos completos obtenidos en el ensayo de flexión.

Los coeficientes de variación que presentan los parámetros en el ensayo de flexión son menores a 15%. Se entiende por coeficiente de variación al cociente entre la desviación estándar y el promedio aritmético. El material compuesto que presenta menor coeficiente de variación es aquel conformado con fibra de raquis de palma africana químicamente tratada con una concentración en peso del 5%. Esto indica que dicho grupo es el que presenta resultados más homogéneos. A pesar de que los materiales con 15% de concentración en peso de fibra presentaron una mayor desviación, el coeficiente de variación no sobrepasaba el 10%. Para la mayoría de los materiales compuestos con fibra de raquis de palma africana el mayor coeficiente de variación presentado fue en el parámetro de deformación en el

punto de fluencia, esto es debido a que en ciertos ensayos de flexión el material no se quebraba totalmente en un instante sino que se produjo un quiebre de poco en poco, lo que ocasionó el coeficiente de variación antes mencionado.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

Tratamiento químico	Concentración en peso (%)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Esfuerzo máximo (KPa)	Módulo de flexión (MPa)
	0	3,41 (Sx = 0,45)	334,68 (Sx = 24,24)	9,92 (Sx = 0,77)
Sin acetilación	5	3,94 (Sx = 0,80)	430,60 (Sx = 14,08)	11,39 (Sx = 1,34)
	10	2,82 (Sx = 0,27)	490,28 (Sx = 36,27)	17,56 (Sx = 1,43)
	15	3,19 (Sx = 0,57)	327,02 (Sx = 27,58)	10,47 (Sx = 0,91)
Con acetilación	5	4,36 (Sx = 0,26)	455,98 (Sx = 5,95)	10,49 (Sx = 0,68)
	10	3,79 (Sx = 0,96)	517,08 (Sx = 15,28)	14,30 (Sx = 2,09)
	15	4,65 (Sx = 1,1)	361,18 (Sx = 19,87)	9,40 (Sx = 0,66)

A continuación se muestran los gráficos de cada uno de los parámetros analizados en el ensayo de flexión y se analizará la tendencia de los resultados obtenidos. En la Figura 3.5 se muestran los resultados obtenidos para el parámetro de la deformación en el punto de fluencia. Se puede apreciar en la Figura 3.5 que el material compuesto con 5% en peso de fibra la deformación aumenta para ambos casos, con 10% en peso de fibra la deformación disminuye en relación con el porcentaje de carga anterior. Y para el material con 15% en peso de fibra se obtuvo la mayor deformación cuando se formuló con fibra tratada, mientras cuando se formuló con fibra sin tratar la deformación es ligeramente menor al del material de poliuretano.

Para el parámetro de deformación en el punto de fluencia, el material compuesto formulado con fibra químicamente tratada presenta mayores resultados que el material compuesto con fibra sin tratar. En cada una de las concentraciones en peso del material compuesto con fibra acetilada, la deformación incrementó en todos sus valores con respecto al material hecho sólo de poliuretano. Esto

probablemente se debe a que el tratamiento químico de acetilación influye y mejora la afinidad entre la matriz de poliuretano y la fibra de raquis de palma africana ya que existe una mayor transferencia de carga de la matriz a la fibra (Barra et al., 2006, p. 588). En la Figura AII.1 se observa que el tratamiento químico es una variable estadísticamente significativa, y que el material compuesto con raquis acetilado presenta valores de deformación mayores.

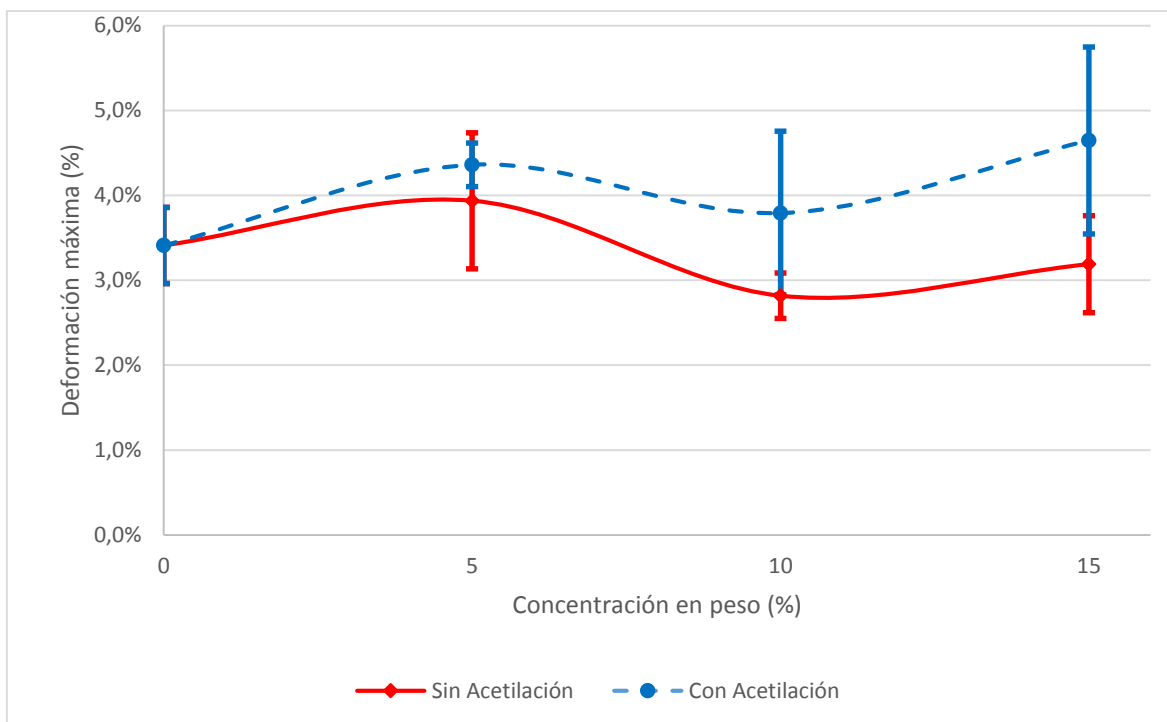


Figura 3.5. Deformación en el punto de fluencia obtenida de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

Como se aprecia en la Figura 3.5 para la deformación en el punto de fluencia el mayor valor obtenido es para el material compuesto con fibra de raquis de palma africana tratada químicamente con una concentración en peso del 15%, en el cual existe un aumento del 36,07% en relación con el material puro (entre sus valores promedios), a pesar de presentar un coeficiente de variación del 23,66% debido a la mala adhesión interfacial por la cantidad de fibra presente. Mientras que para el material compuesto con fibra de raquis de palma africana sin tratar con una concentración en peso del 15% existe una disminución del 6,45% en el valor promedio de deformación en el punto de fluencia; se obtuvo una media cercana al valor medio presentado por el material puro, por tanto el material compuesto

desarrollado presenta la propiedad de deformación similar al del poliuretano. Esto se ratifica con la Figura All.2, gráfico de medias obtenido con el programa Statgraphics, en el cual se observa que no existe una diferencia significativa en el parámetro de deformación entre el material puro y el material compuesto con 15% en peso de fibra.

En la Figura 3.6 se muestran los resultados para el esfuerzo máximo o resistencia a la flexión. La tendencia del esfuerzo es que aumenta cuando se formula el material con 5% en peso de fibra. Se obtuvieron los mayores resultados cuando se utilizó 10% en peso de fibra y, cuando se formuló con 15% en peso de fibra los resultados del esfuerzo máximo son similares al del material puro. La tendencia es similar para el material compuesto formulado con fibra tratada químicamente así como formulado con fibra sin tratar, se observa que los resultados con fibras tratadas químicamente son ligeramente mayores que los presentados por los materiales compuestos formulados con fibras sin tratar. Sin embargo, con base en la Figura All. 3 se observa que existe una diferencia significativa entre el material compuesto con fibra sin tratar y el material con fibra químicamente tratada.

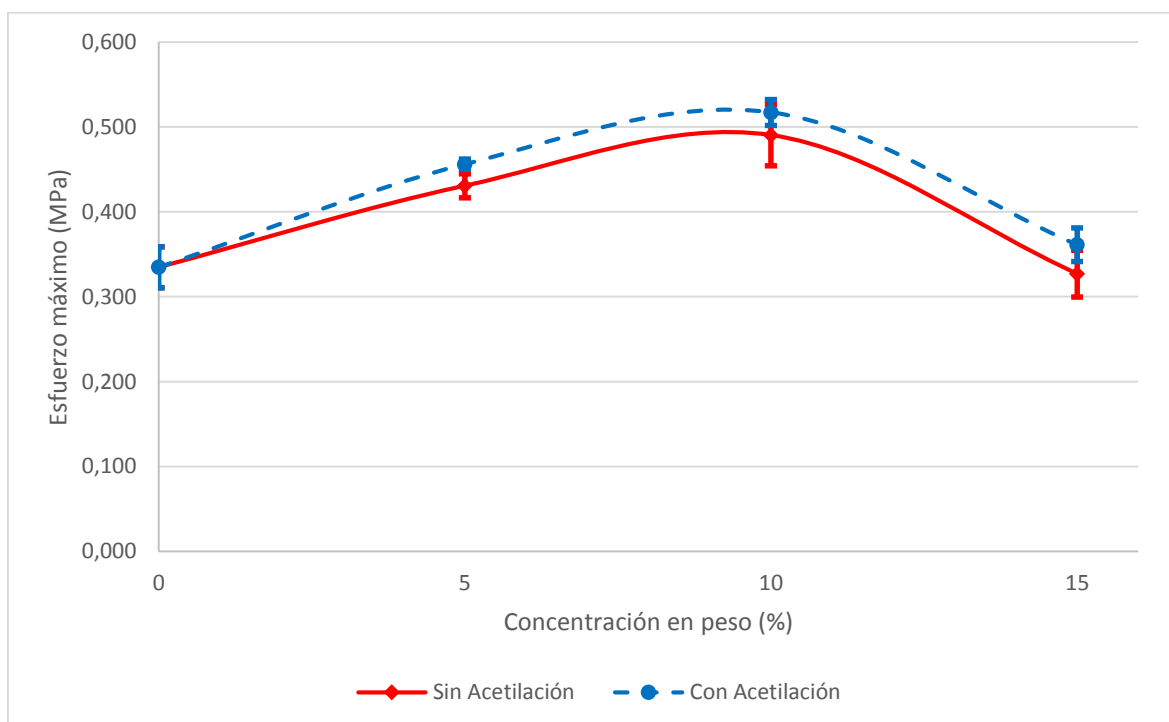


Figura 3.6. Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

El aumento en la resistencia a la flexión se debe a la absorción de esfuerzo por parte de la fibra. Con fibra químicamente tratada los valores de esfuerzo máximo son mayores ya que en los materiales con fibra acetilada existe mayor cantidad de enlaces uretanos. Al existir mayor cantidad de enlaces, los grupos OH de las fibras con los isocianatos forman una red cohesiva para que absorba y distribuya la carga de manera uniforme por todo el material (Rozman, Ahmad y Abubakar, 2007, p. 2296). Badri et al. (2006) dice que cuando el esfuerzo máximo disminuye es porque se presenta una mala adhesión de las fibras a la matriz de poliuretano rígido debido a una mala formulación (p. 194). Por lo tanto se observa que la adhesión mejora cuando se formuló al material con 10% en peso de fibra, mientras que la adhesión empeora cuando se formuló al material con 15% en peso de fibra de raquis de palma africana. En la Figura All. 4 se ratifica que los mayores resultados se consiguen con el material compuesto con 5% de fibra y que los más bajos resultados se consiguen cuando se formula el material con 15% en peso con fibra de raquis de palma africana. Sin embargo, en la Figura All. 4 se observa que no existe diferencia significativa en el esfuerzo máximo del material hecho únicamente de poliuretano con el material compuesto con 15% en peso de raquis.

En la Figura 3.6 se puede observar que para todos los tipos de materiales compuestos el valor promedio de resistencia a la flexión se incrementa, excepto para el material que tiene una concentración de 15% en peso de fibra sin acetilar, donde se muestra una disminución del 2,28% de la media en relación con el material puro. Para el material compuesto con una concentración en peso del 15% de fibra acetilada se obtiene un aumento del 7,91% de la media respecto al material puro. El valor máximo lo presentan los materiales compuestos cuyas concentraciones en peso de fibra son del 10%, con incremento del 54,49% para el raquis acetilado y un incremento del 46,49% para el raquis sin acetilar, en comparación con la media del material puro. Las fibras acetiladas producen un material compuesto con mayor habilidad de absorber el esfuerzo. El esfuerzo máximo es mayor para el material con fibra químicamente tratada, debido a que en el proceso de acetilación se forman enlaces adicionales que mejoran la interacción matriz-fibra (Rozman et al., 2007, p. 2294).

En la Figura 3.7 se muestran los resultados obtenidos para el parámetro de módulo de flexión del material compuesto de poliuretano con fibra de raquis de palma africana. La tendencia para el material compuesto con fibra sin acetilar es el aumento del módulo de flexión cuando se añade 5% y 10% en peso de fibra, mientras que cuando se formula con 15% en peso de fibra el material presenta un módulo similar al del material puro. Para el material compuesto con fibra acetilada, el módulo de flexión aumenta sólo cuando se formula con 10% en peso de fibra ya que para las demás concentraciones el módulo la variación es mínima. En la Figura All. 5 se observa que el tratamiento químico es una variable estadísticamente significativa.

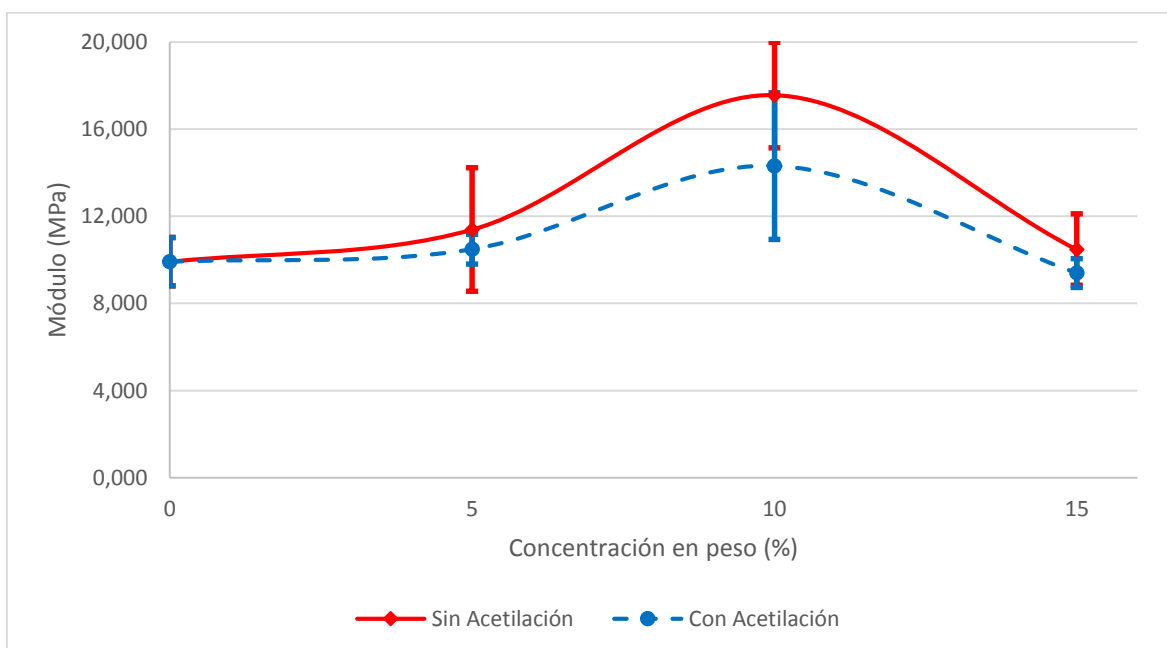


Figura 3.7. Módulo de flexión obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

Se observa que mayores módulos se obtienen cuando se formula el material compuesto con raquis de palma africana sin acetilar. Los materiales compuestos hechos con una concentración del 10% en peso de fibra son los que mayores resultados ofrecen, con fibra de raquis de palma africana tratada químicamente se muestra un aumento del 44,15% en relación con el material puro mientras que con fibra sin tratamiento químico muestra un aumento del 77,02% en comparación con

el material puro. Para los materiales con 15% en peso de fibra, tanto con raquis acetilado y sin acetilar, el módulo de flexión presenta valores cercanos al del material puro, con una variación no mayor al 5%. En la Figura All. 6 se observa que no hay diferencia estadísticamente significativa entre el material puro, el material compuesto con raquis al 5% en peso y el material compuesto con 15% en peso de fibra.

El módulo de flexión indica que tan rígido es un material, a medida que su módulo aumenta el material se vuelve más rígido. La tendencia muestra que el módulo aumenta cuando se incorpora la fibra, esto quiere decir que la rigidez de la fibra contribuye a la rigidez del material compuesto. Puesto que el material compuesto es una alternativa para reemplazar las planchas de poliuretano, las cuales son usadas en la industria de la construcción o en la tecnología de refrigeración, no es conveniente que el material compuesto pierda flexibilidad por lo que los materiales formulados con 15% de fibra, con una rigidez similar al del poliuretano, pueden ser utilizados para los fines anteriormente mencionados.

Se observa en la Figura All. 5 que los materiales compuestos con fibra químicamente tratada presentan menores módulos de flexión en comparación con los materiales compuestos formulados con fibra sin tratamiento químico. A menor módulo de flexión mayor flexibilidad. En los materiales con fibra acetilada primero reaccionan los grupos OH del polioliol con los isocianatos, mientras que en los materiales con fibra no acetilada primero reaccionan los grupos OH de la fibra con los isocianatos. Por lo tanto, los materiales compuestos con fibra químicamente tratada poseen cadenas más largas lo que les proporciona mayor flexibilidad al material (Rozman, Ahmadhildi y Abubakar, 2004, p. 564).

- **Material compuesto con fibra de cabuya**

Los resultados que se obtuvieron en los ensayos de flexión en el material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya se muestran en la Tabla 3.2.

La deformación en el punto de fluencia, esfuerzo máximo y módulo de flexión fueron los parámetros que se analizaron.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

Tratamiento químico	Concentración en peso (%)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Esfuerzo máximo (KPa)	Módulo de flexión (MPa)
	0	3,41 (Sx = 0,45)	334,68 (Sx = 24,24)	9,92 (Sx = 0,77)
Sin acetilación	5	3,61 (Sx = 0,79)	403,04 (Sx = 38,26)	14,13 (Sx = 0,98)
	10	2,99 (Sx = 0,82)	460,62 (Sx = 13,32)	17,82 (Sx = 1,05)
	15	4,04 (Sx = 1,01)	323,82 (Sx = 30,47)	9,02 (Sx = 1,75)
Con acetilación	5	3,58 (Sx = 0,59)	453,36 (Sx = 22,63)	12,98 (Sx = 0,70)
	10	3,56 (Sx = 0,47)	524,18 (Sx = 18,18)	14,93 (Sx = 0,94)
	15	4,87 (Sx = 1,16)	393,22 (Sx = 19,81)	9,07 (Sx = 1,48)

En la Tabla 3.2 se muestran los valores promedios de los parámetros con su respectiva desviación estándar para cada uno de los materiales compuestos de poliuretano rígido con distintas concentraciones en peso de fibra de cabuya, donde se incluyen también los valores promedios para materiales compuestos con fibra sin tratamiento químico y para materiales compuestos formulados con fibra químicamente tratada. En el Anexo I se presentan los datos completos obtenidos en el ensayo de flexión.

En la Tabla 3.2 se indican además los valores de las desviaciones estándar para los parámetros evaluados en el ensayo de flexión. Los materiales compuestos que presenta menor coeficiente de variación son aquellos formulados con fibra químicamente tratada. Al igual que con el raquis de palma africana el proceso de acetilación mejoró la compatibilidad entre la matriz y la cabuya, los materiales formulados con fibra químicamente tratada presentaron menor coeficiente de variación. A medida que la concentración en peso de fibra aumentaba, el coeficiente de variación también lo hacía debido a que la adhesión entre las fases empeoraba. En los ensayos de flexión con los materiales de cabuya se

presentaron los mismos problemas que con el material de raquis de palma africana, donde algunos de los materiales no se partían en un instante por completo sino que la ruptura se realizaba de poco en poco, lo que ocasionó el alto coeficiente de variación que se observa para los parámetros de desplazamiento y deformación.

A continuación se muestran las figuras para cada uno de los parámetros evaluados en los ensayos de flexión del material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana. En la Figura 3.8 se observa que los resultados de la deformación en el punto de fluencia para todos los materiales compuestos incrementaron en relación con el material puro, excepto para el material compuesto con 10% en peso de fibra de cabuya no acetilada que se presentó una disminución en el valor promedio, lo que muestra que bajo estas condiciones es cuando menos existe afinidad entre la cabuya y la matriz. En la Figura All. 7 se observa que el tratamiento químico a las fibras no es una variable estadísticamente significativa.

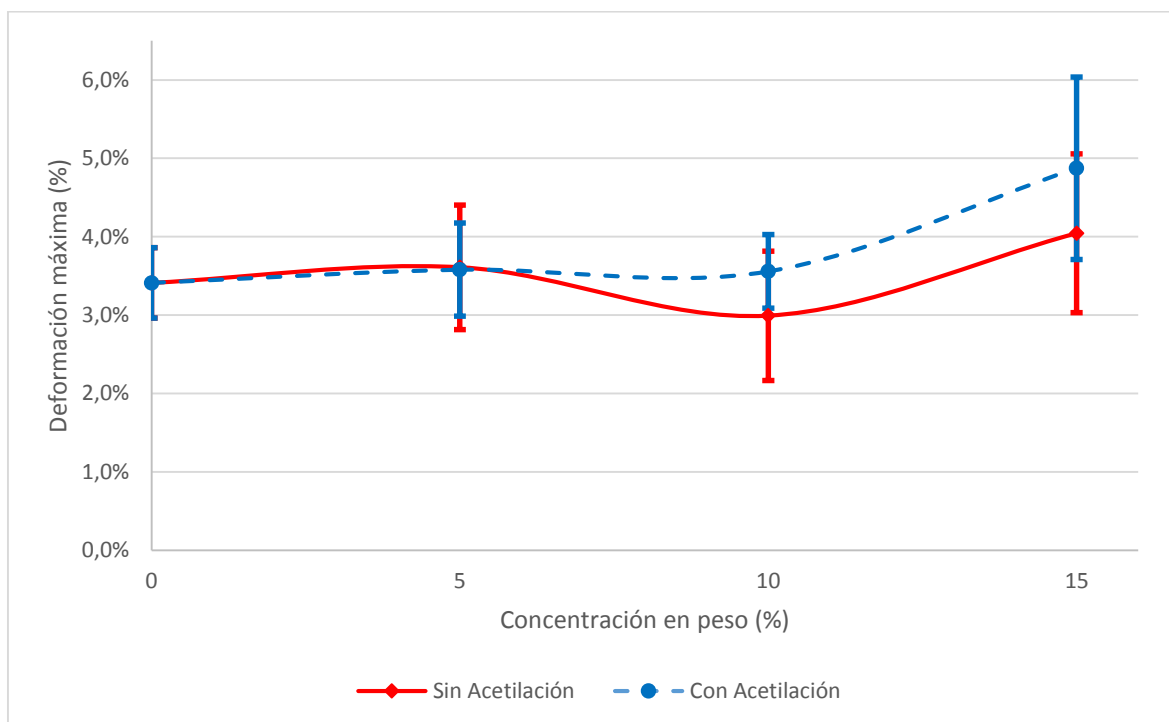


Figura 3.8. Deformación en el punto de fluencia obtenida de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

En la Figura 3.8 se puede apreciar que los mayores resultados se obtienen con un material compuesto cuya concentración en peso de fibra es del 15%, y con dicha concentración el material formulado con fibra químicamente tratada presenta el más alto resultado entre los demás, con un aumento del 42,82% en relación con el material puro. El material compuesto con 15% en peso de cabuya sin acetilar presenta un aumento del 18,48%. Por otro lado el coeficiente de variación que presentan estos materiales compuestos es del 25% y se debe por el exceso de fibra que contienen, lo que no permitió una distribución adecuada de las fibras en la matriz. En la Figura All. 8 se observa que el material puro presenta una diferencia estadísticamente significativa solamente con el material compuesto con 15% en peso de cabuya.

La resistencia a la flexión del material compuesto con cabuya se muestra en la Figura 3.9. La tendencia del esfuerzo máximo que presentan los materiales compuestos formulados con fibra tratada y sin tratar es similar, se observa que con 5% en peso de fibra el parámetro aumenta, para 10% de fibra sigue en aumento hasta alcanzar su valor máximo y para 15% en peso de fibra el módulo decrece hasta valores similares al del material puro. Para todas las concentraciones en peso de cabuya, excepto cuando el material es formulado con 15% en peso de fibra sin acetilar, existe un incremento de esfuerzo lo que quiere decir que con la incorporación de fibra se necesita más fuerza para romper al material compuesto. En la Figura All. 10 se observa que el material compuesto con 15% en peso de cabuya no difiere significativamente con el material puro.

Cuando la resistencia a la flexión aumenta es porque ocurre una transferencia de esfuerzo de la matriz a las fibras. Esto se debe a que el proceso de acetilación produjo enlaces adicionales de uretano que mejoran la compatibilidad fibra-matriz (Rozman, Ahmadhilmil y Abubakar, 2004, p. 565). Es por esto, que se observa en la Figura 3.9 que el material formulado con fibras con tratamiento químico presentan mayores resultados en relación con los materiales con fibra sin tratamiento químico. En la Figura All. 9 se observa que el material compuesto con fibra de cabuya acetilada es estadísticamente diferente al material compuesto con cabuya sin tratamiento químico.

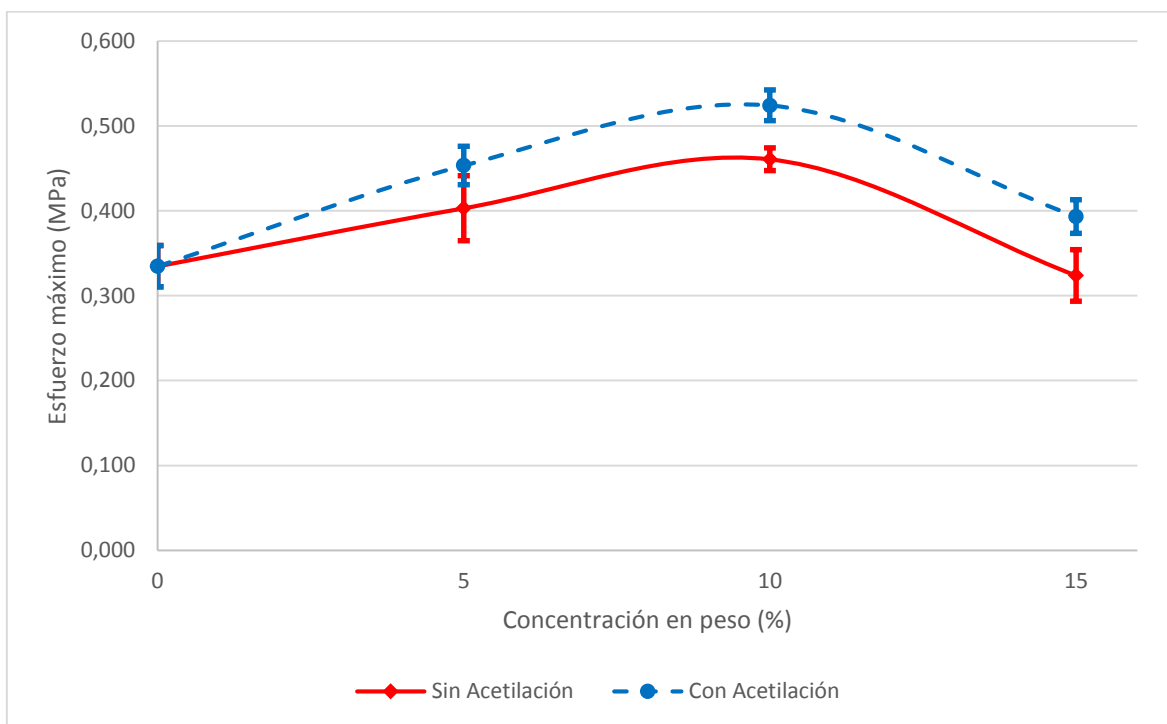


Figura 3.9. Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

El esfuerzo máximo aumenta para todos los materiales compuestos excepto para el material compuesto con 15% de cabuya sin acetilar cuya disminución no es significativa ya que es menor al 5%. Para el material compuesto con 15% en peso de cabuya acetilada se tiene un aumento del 17,49% en comparación con el material puro. Los materiales formulados con 10% en peso de fibra fueron los que presentaron los mayores resultados. El material formulado con fibra acetilada aumentó un 56,62% mientras que el material formulado con fibra sin acetilar aumentó un 37,63%. Por lo tanto se concluye que se obtienen mayores resultados con el material compuesto formulado con fibra químicamente tratada debido a que el proceso de acetilación mejoró la afinidad entre el poliuretano y la cabuya.

En la Figura 3.10 se muestran los resultados obtenidos para el módulo de flexión. Se observa que tanto para el material con fibra acetilada como para el material con fibra sin acetilar existe un incremento en dicho parámetro en relación con el material puro de poliuretano, excepto para el material formulado con 15% en peso de fibra. El valor del módulo de flexión aumenta cuando se formula el material con

5% y 10% en peso de fibra, mientras que para los materiales formulados con 15% en peso de fibra el módulo es prácticamente igual al presentado por el material puro. El incremento del módulo se debe a la presencia de fibra, ya que la rigidez propia de la fibra es transferida al poliuretano. Se observa lo mismo en la Figura All.12, donde el material puro no presenta diferencia significativa con el material compuesto con 15% en peso de cabuya.

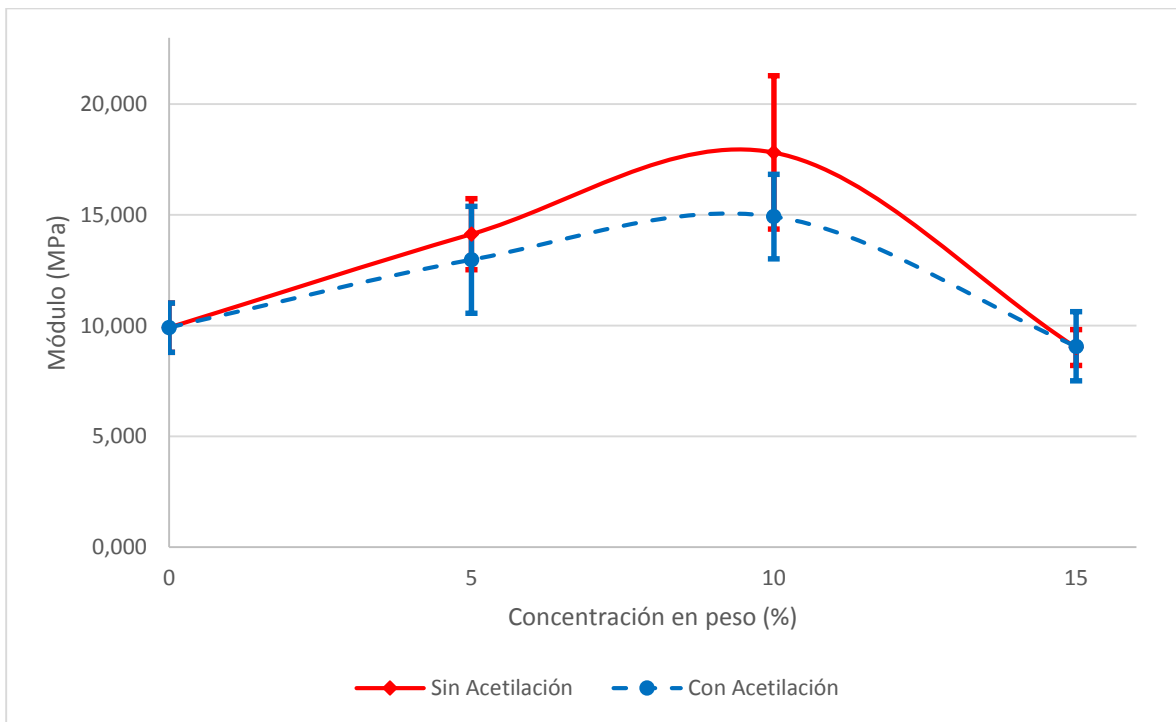


Figura 3.10. Módulo de flexión obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

Para los materiales con 15% en peso de fibra, el módulo de flexión varía de manera mínima, ya que para los materiales formulados con fibra tratada y sin tratar hay una disminución menor del 3%. El menor valor de módulo de flexión que se presentó fue con 15% en peso de fibra debido a que se encuentra en exceso la fibra en la matriz lo que no permite una buena distribución y en consecuencia la rigidez de la fibra es transferida de una manera deficiente. Para los materiales con 10% en peso de fibra se alcanzaron los mayores resultados, se presentó un aumento del 79,80% cuando se formuló con fibra sin tratamiento químico y un aumento del 50,62% cuando se formuló con fibra químicamente tratada. Se observa en la Figura 3.10 que los materiales formulados con cabuya sin tratamiento químico alcanzan

resultados más altos. Esto es debido a que con el tratamiento químico se forman cadenas más largas lo que le proporciona mayor flexibilidad al material (Hassan et al, 2010, pp. 2093). Pero en la Figura All. 11 se observa que el material compuesto con fibra acetilada no presenta una diferencia estadísticamente significativa del material compuesto con fibra sin acetilar.

En el Anexo III se muestra los resultados del análisis estadístico ANOVA, se utilizó el software Statgraphics se diseñó un modelo estadístico para evaluar el impacto de las variables del presente proyecto (concentración en peso de fibra, tipo de fibra y tratamiento químico a la fibra) sobre los parámetros del ensayo de flexión: desplazamiento en el punto de fluencia, deformación en el punto de fluencia, carga máxima, esfuerzo máximo y módulo de flexión. Se observa que el tipo de fibra no es una variable estadísticamente significativa sobre ningún parámetro, es decir, que el tipo de fibra no influye sobre los parámetros analizados en el ensayo de flexión. Esto se observa en las gráficas donde la tendencia, tanto del material con fibra de raquis de palma africana y del material con fibra de cabuya, tienen una gran similitud, por lo que si se desea seleccionar un sólo tipo de fibra se basaría en la facilidad y costos de obtención de la fibra, mas no en las propiedades que la cabuya o el raquis de palma africana puedan transmitir al poliuretano. Además, se muestra que el tratamiento químico afecta a los resultados del módulo de flexión, ya que según la tabla ANOVA presenta un efecto estadísticamente significativo sobre dicho parámetro. Esto quiere decir que la rigidez del material compuesto se ve afectada por el tratamiento químico que se realice a la fibra, ya que si se formula el material compuesto con fibra químicamente tratada el material es menos rígido en comparación con el formulado con fibra sin tratamiento. Por último, se observa en el Anexo II que la concentración en peso de fibra natural influye sobre todos los parámetros en el ensayo de flexión, esto quiere decir que la cantidad de fibra que se añade como carga al poliuretano afecta a la propiedad de flexión del material compuesto.

- **Comparación de los materiales compuestos con fibra de raquis de palma africana y con fibra de cabuya en el ensayo de flexión**

En la Figura 3.11 se comparan los resultados obtenidos en el parámetro de deformación en el ensayo de flexión para todos los materiales compuestos formulados.

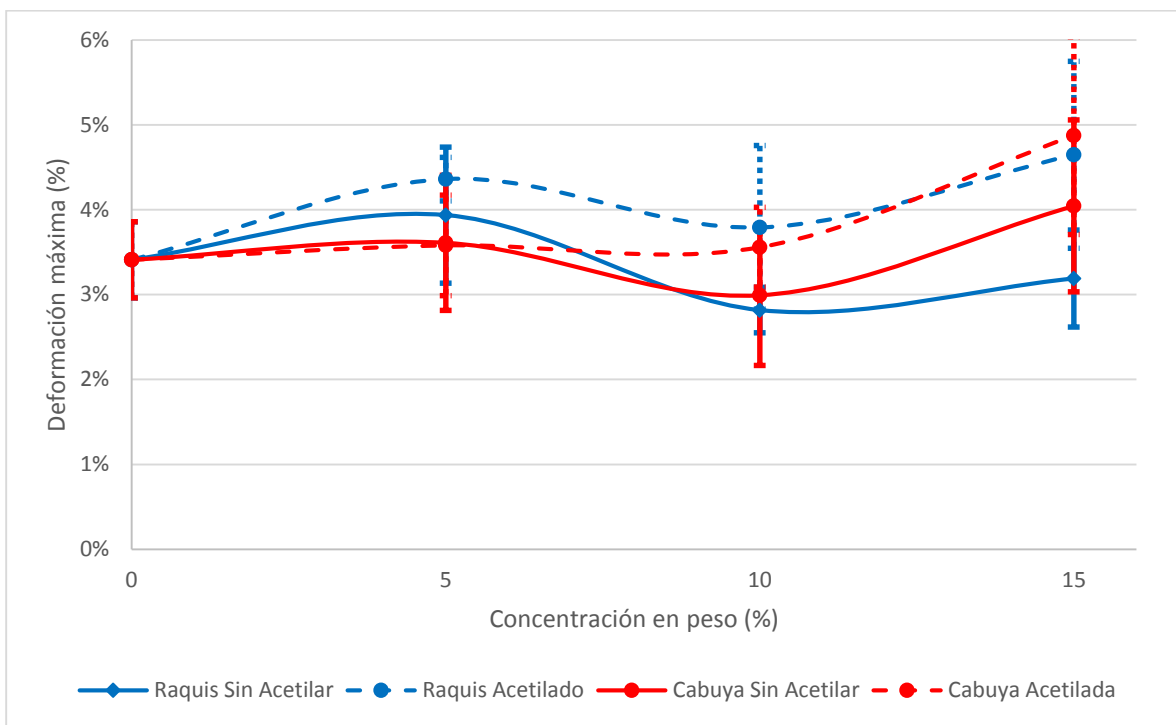


Figura 3.11. Deformación en el punto de fluencia obtenida de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con fibra de raquis de palma africana

Se observa que cuando se formula el material con 5% y 10% en peso de fibra, los valores de deformación se aproximan al valor presentado por el material puro. Cuando se formula el material con 15% en peso de fibra, la deformación aumenta. Los valores más altos de deformación exhiben los materiales formulados con 15% en peso con fibra químicamente tratada. Con el porcentaje en peso de 15% de fibra, si se compara entre los dos tipos de fibra utilizada en este proyecto, se observa que la fibra de cabuya presenta deformaciones más altas que la fibra de raquis de palma africana, por lo que se concluye que la fibra de cabuya tiene mayor afinidad con la matriz de poliuretano.

En la Figura 3.12 se comparan los resultados obtenidos en el parámetro resistencia a la flexión en el ensayo de flexión para todos los materiales compuestos formulados. Se observa que la resistencia a la flexión aumenta con 5% en peso de fibra y alcanza su valor máximo cuando se formula el material con 10% en peso, mientras que cuando se usa 15% de fibra la resistencia a la tracción disminuye hasta presentar valores similares al del material puro.

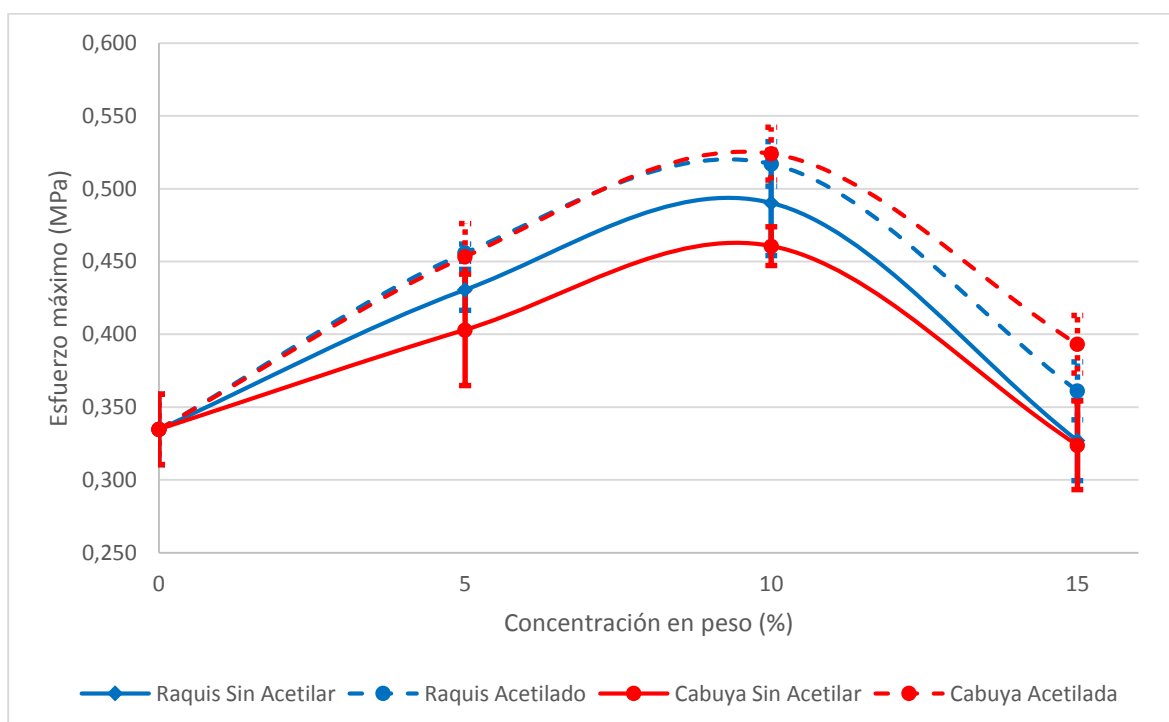


Figura 3.12. Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y con fibra de raquis de palma africana

Cuando se formula con 15% en peso de fibra, el esfuerzo máximo es igual o mayor que el material de poliuretano. Los materiales formulados con fibra químicamente tratada presentan resistencia a la flexión más alta que los materiales con fibra sin tratar. Si se comparan los materiales entre los dos tipos de fibra con 15% en peso, se observa que con la fibra de cabuya se obtienen resultados ligeramente más altos. Por lo que la fibra de cabuya presenta una ligera mejor capacidad de absorber y distribuir el esfuerzo que recibe el material compuesto.

En la Figura 3.13 se comparan los resultados obtenidos en el parámetro de módulo de flexión en el ensayo de flexión para todos los materiales compuestos formulados. Se observa una tendencia similar a la de la resistencia a la tracción. El módulo de flexión aumenta con 5% en peso de fibra y alcanza su valor máximo cuando se formula el material con 10% en peso. Cuando se usa 15% de fibra el módulo de flexión disminuye hasta presentar valores similares al del material hecho únicamente de poliuretano.

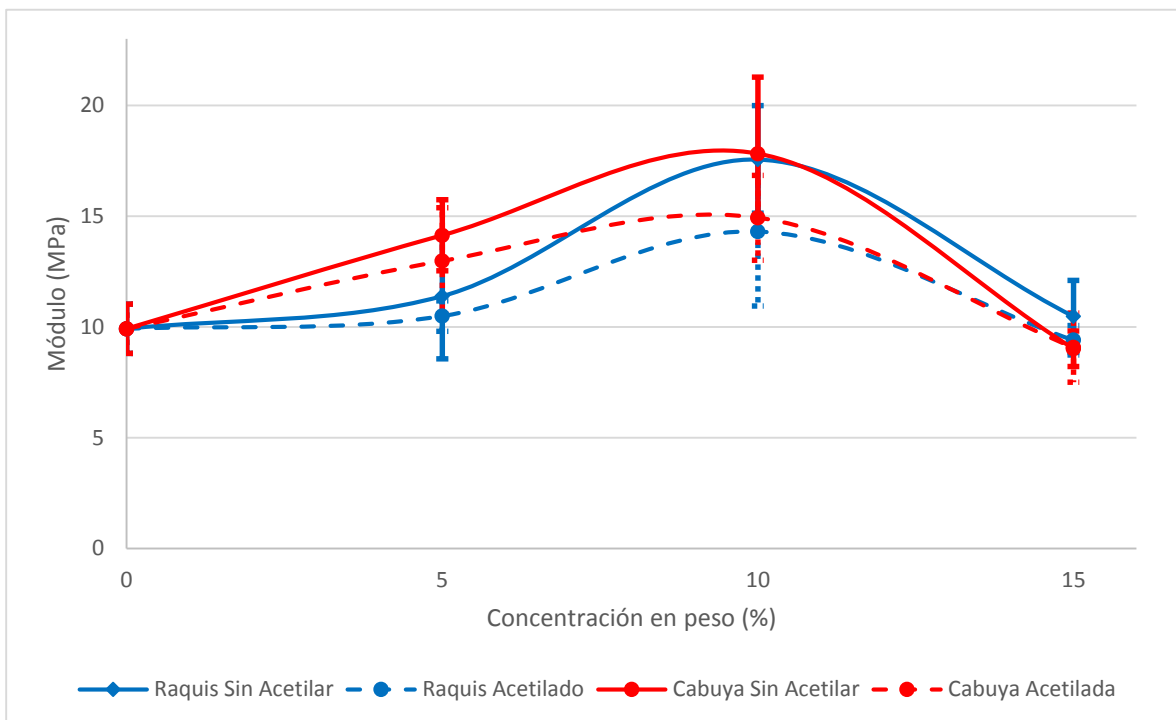


Figura 3.13. Módulo de flexión obtenido de los ensayos de flexión al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

Los materiales formulados con fibra sin tratar presentan módulos más altos que los materiales formulados con fibra químicamente tratada, es decir, los materiales con fibra tratada son menos rígidos. Al comparar los dos tipos de fibra con un porcentaje en peso de 15%, se observa que la diferencia entre los valores de los módulos es mínima. Por lo tanto, se deduce que tanto la fibra de cabuya como la fibra de raquis de palma africana proporcionan el mismo nivel de rigidez al poliuretano.

3.3.1.2. Ensayo de tracción

- **Material compuesto con fibra de raquis de palma africana**

Para los ensayos de tracción se evaluaron los siguientes parámetros: deformación al pico, esfuerzo máximo y módulo de Young. En la Tabla 3.3 se muestran los resultados para dichos parámetros para cada uno de los materiales compuestos con fibra de raquis, donde se formuló con distintas concentraciones en peso de fibra y se utilizó fibra con tratamiento químico y sin tratamiento químico. Además en la misma tabla se muestran las desviaciones estándar que se presentaron en el ensayo para cada parámetro analizado. En el Anexo IV se presentan los datos completos del ensayo de tracción.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

Tratamiento químico	Concentración en peso (%)	Deformación al pico (%)	Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo de Young (MPa)
	0	6,87 (Sx = 1,57)	317,96 (Sx = 49,12)	8,21 (Sx = 0,79)
Sin acetilación	5	5,67 (Sx = 0,57)	348,18 (Sx = 17,94)	11,89 (Sx = 1,12)
	10	4,17 (Sx = 0,53)	259,24 (Sx = 20,64)	10,43 (Sx = 1,36)
	15	2,68 (Sx = 1,46)	225,32 (Sx = 33,68)	10,58 (Sx = 0,89)
Con acetilación	5	7,50 (Sx = 0,97)	437,60 (Sx = 19,91)	9,19 (Sx = 0,78)
	10	4,47 (Sx = 0,32)	301,52 (Sx = 33,14)	9,53 (Sx = 0,81)
	15	4,01 (Sx = 0,96)	239,38 (Sx = 33,58)	10,07 (Sx = 1,99)

Se presenta un alto coeficiente de variación en los resultados de los parámetros mostrados en la Tabla 3.3. Esto se debe a las dificultades que se presentaron al momento de ajustar las mordazas. La presión con la que se justaron las mordazas fue de forma manual con el uso de una llave de tuercas, debido a que el sistema de presión de aire que se utiliza normalmente para dicho ajuste destruía a la probeta. El ajuste manual ocasionó que la fuerza con la que se ajustaban las probetas no era la misma para cada ensayo, esto originó el coeficiente de variación que se presentan en los resultados de la Tabla 3.3. Además la superficie lisa que

presenta el material compuesto ocasionaba que en el momento de tracción del ensayo la probeta se resbale entre las mordazas, por lo que se tuvo que repetir algunas pruebas, a pesar de que se utilizó accesorios para evitar el deslizamiento del material compuesto.

Las siguientes figuras muestran los resultados que se obtuvieron para los parámetros en el ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana. Para el material compuesto con fibra de raquis de palma africana se observa la deformación al pico en la Figura 3.14. En este parámetro se observa que la tendencia es decreciente. Todos los materiales compuestos presentan una disminución en la deformación con respecto al material puro, excepto por el material formulado con 5% en peso con fibra tratada.

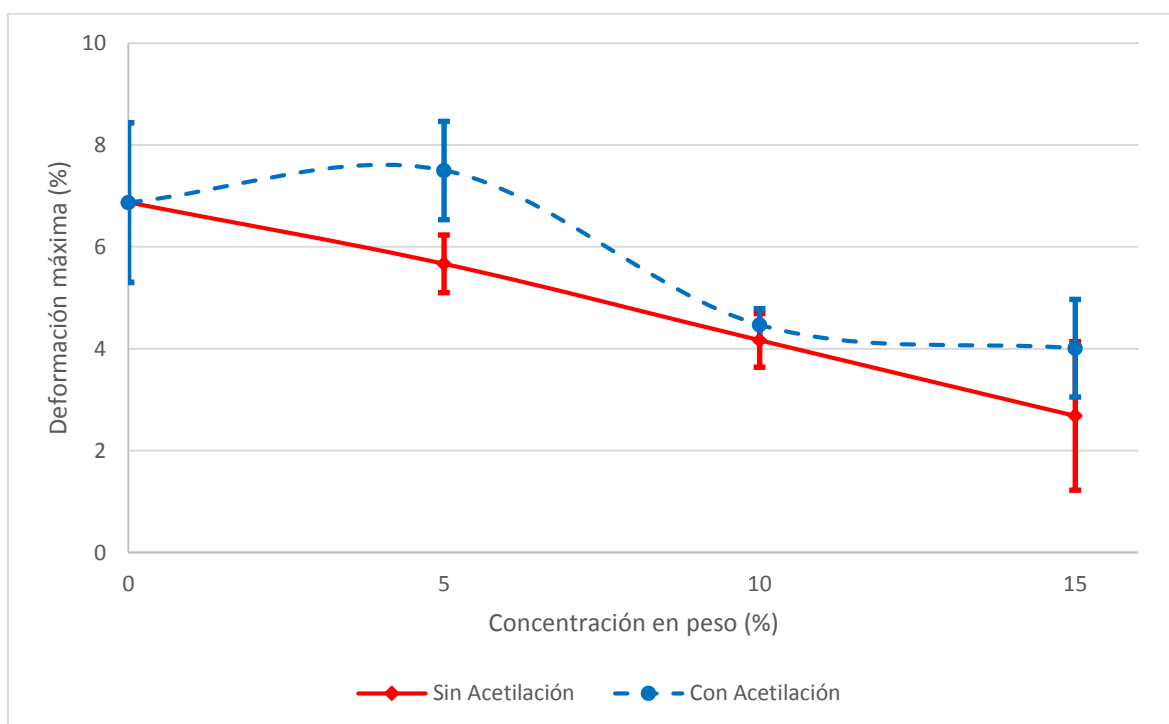


Figura 3.14. Deformación al pico obtenida de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

A medida que se aumenta el porcentaje de fibra la deformación al pico tiende a disminuir. Esto quiere decir que la fibra vuelve al material más rígido y pierde la elasticidad original de poliuretano. Para el material compuesto con 15% en peso con raquis de palma africana sin acetilar existe una disminución del 60,99%,

mientras que para el material con 15% en peso con raquis de palma africana acetilado existe una disminución del 41,63% en relación con el material puro. En la Figura All.14 se observa que el material puero presenta una diferencia significativa con los materiales compuestos al 10% y 15% en peso de fibra.

Con base en el estudio de Rozman et al. (2004), se concluye que el tratamiento químico proporciona mayor deformación al material porque se forman cadenas más largas (p. 565), tal como lo muestra la Figura 3.14 cuando la concentración es de 5 y 15% en peso de fibra. El material compuesto formulado con raquis de palma africana acetilada tiene mayor elasticidad y menor rigidez que el material compuesto formulado con raquis sin tratamiento químico. Lo que concuerda con la Figura All.13 en donde se observa que el tratamiento químico provoca una diferencia significativa en la deformación.

En la Figura 3.15 se muestran los resultados que se obtuvieron de esfuerzo máximo para los materiales compuestos con raquis de palma africana. La resistencia a la tracción presenta mayores resultados cuando se formula el material compuesto con fibra químicamente tratada, esto sucede para todas las distintas concentraciones en peso de fibra. El aumento del esfuerzo sucede porque los grupos OH de la lignocelulosa de la fibra, activados en la acetilación, actúan como el poliol para la correspondiente reacción con el isocianato formándose más cadenas para absorber el esfuerzo (Rozman, Ahmad y Abubakar, 2007, p. 2297). En la Figura All.15 se observa que material compuesto con fibra tratada presenta una diferencia estadísticamente significativa al material compuesto con fibra sin tratar.

Existe un aumento en la resistencia la tracción cuando se formula al material con una carga en peso del 5%, se presenta un incremento de 9,50% con fibra sin acetilar y un incremento de 37,63% con fibra acetilada en comparación con el material puro, este incremento se debe a la absorción de esfuerzo por parte de la fibra. La resistencia a la tracción aumenta porque hubo una buena dispersión de la fibra a través de la matriz lo que ayudó a la transferencia y distribución uniforme del esfuerzo por todo el material. En la Figura 3.15 se observa que para el material compuesto con una carga en peso de 15% se presenta una disminución 29,14%

con fibra sin acetilar y una disminución del 24,71% con fibra acetilada. Los valores de esfuerzo máximo decrecen en relación con el material de poliuretano en consecuencia que el exceso de fibra ocasiona una pobre adhesión con la matriz lo que se ve reflejado en la disminución de las propiedades del material compuesto. En la Figura All.16 se observa que el material puro difiere estadísticamente del material compuesto en todas las concentraciones en peso de fibra.

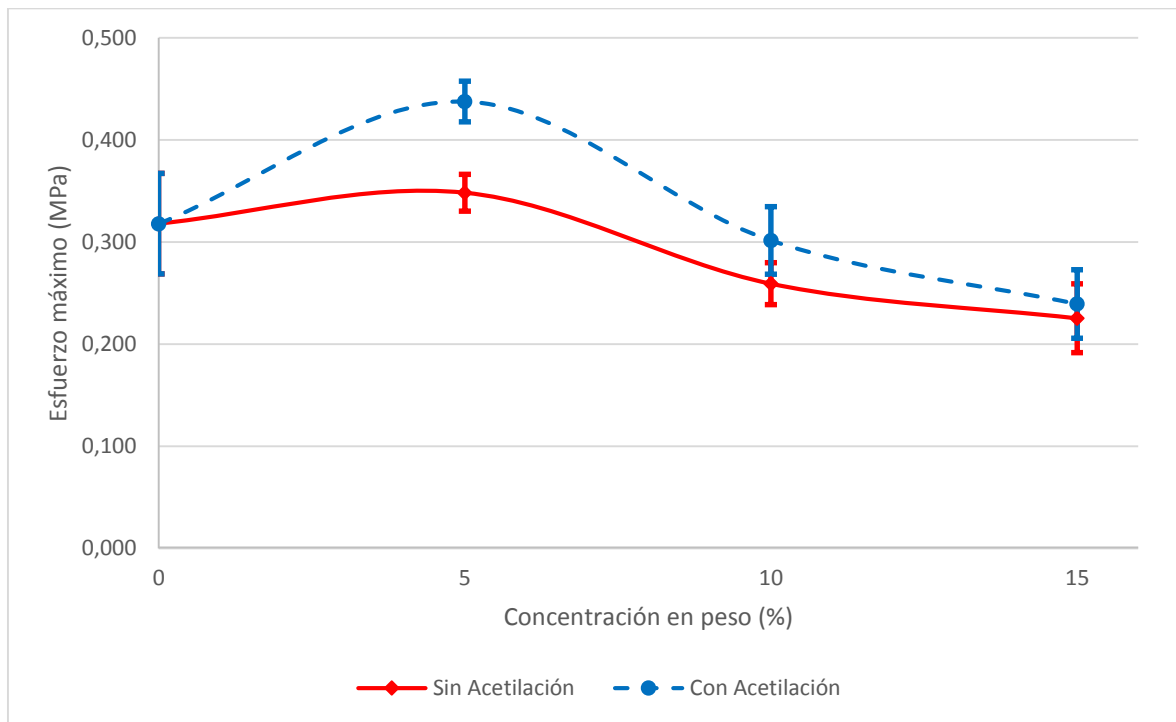


Figura 3.15. Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

Los resultados obtenidos del módulo de Young para el material compuesto con fibra de raquis de palma africana son representados en la Figura 3.16. El módulo de Young es un indicador que sirve para conocer la rigidez del material, a mayor valor del módulo el material será más rígido.

En la Figura 3.16 se observa que en todas las concentraciones en peso de raquis de palma africana e independientemente del tratamiento químico previo a las fibras, el módulo de Young aumenta en comparación con el material puro de poliuretano. Esto se debe a la contribución de la rigidez propia de la fibra de raquis de palma africana. Se puede apreciar que el incremento del módulo de Young es mayor

cuando se formula el material compuesto con fibra de raquis no acetilada ya que el tratamiento químico aumenta la movilidad de las fibras en la matriz, por lo que movilidad se traduce en mayor flexibilidad para el material compuesto (Rozman, Ahmadilmi y Abubakar, 2004, p. 565). En la figura All.17 se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre el material compuesto con fibra sin tratar y el material con fibra tratada. El material compuesto cuya concentración en peso es de 15% con fibra no acetilada presenta un aumento de 28,87% mientras que el material compuesto cuya concentración en peso es de 15% con raquis de palma africana acetilado presenta un aumento de 22,65% en comparación con el material hecho sólo de poliuretano. En la Figura All.18 se observa que los materiales compuestos no difieren estadísticamente entre sí, pero si existe una diferencia significativa del material compuesto con el material puro.

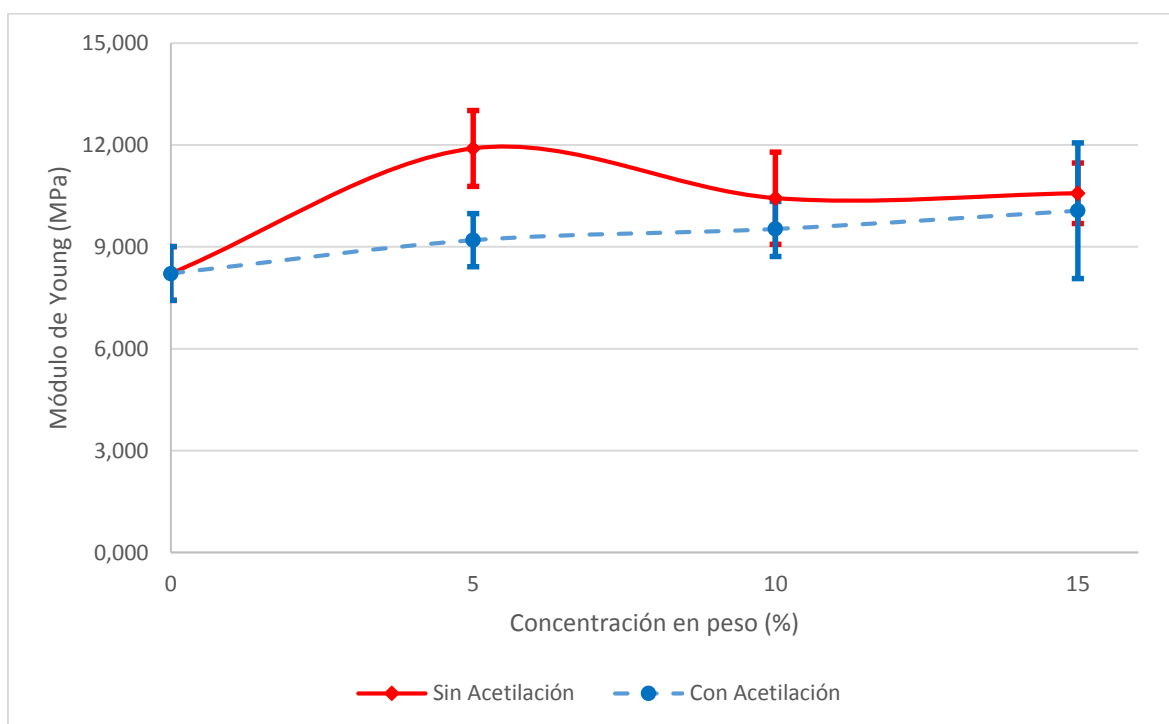


Figura 3.16. Módulo de Young obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana

- **Material compuesto con fibra de cabuya**

Los parámetros analizados en el ensayo de tracción para el material compuesto con fibra de cabuya fueron: deformación al pico, esfuerzo máximo y módulo de Young. Los resultados de cada uno de los materiales compuestos para dichos parámetros se muestran en la Tabla 3.4 con sus respectivas desviaciones estándar. En el Anexo IV se presentan los datos completos del ensayo de tracción.

El alto coeficiente de variación que existen en los resultados que se muestran en la Tabla 3.4 se debe a las mordazas mecánicas que se utilizaron en el ensayo, el ajuste se lo realizó manualmente por lo que resultó imposible ajustar a todas las probetas con la misma fuerza y probablemente algunas ya comenzaron a quebrarse en el ajuste y no en el ensayo. A pesar de que se utilizó accesorios para evitar el deslizamiento del material compuesto, esto no garantizó que el material no se resbale entre las mordazas.

Tabla 3.4. Resultados obtenidos de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

Tratamiento químico	Concentración en peso (%)	Deformación al pico (%)	Esfuerzo máximo (kPa)	Módulo de Young (MPa)
	0	6,87 (Sx = 1,57)	317,96 (Sx = 49,12)	8,21 (Sx = 0,79)
Sin acetilación	5	6,19 (Sx = 1,13)	378,34 (Sx = 13,53)	11,11 (Sx = 1,25)
	10	5,31 (Sx = 1,58)	299,98 (Sx = 21,51)	10,05 (Sx = 1,88)
	15	4,36 (Sx = 0,28)	321,12 (Sx = 17,23)	15,77 (Sx = 2,26)
Con acetilación	5	7,33 (Sx = 0,94)	433,54 (Sx = 26,09)	9,32 (Sx = 0,83)
	10	6,10 (Sx = 0,79)	362,94 (Sx = 20,41)	10,56 (Sx = 0,95)
	15	4,91 (Sx = 0,78)	369,44 (Sx = 29,29)	13,05 (Sx = 1,24)

A continuación se muestran las figuras donde se representan los resultados obtenidos para: deformación al pico, esfuerzo máximo y módulo de Young. Para el material compuesto de poliuretano con fibra de cabuya la Figura 3.17 muestra la deformación al pico. La deformación presenta una tendencia decreciente, se observa que a medida que se incrementa la concentración en peso de fibra la

deformación disminuye. Esto ocurre debido a que el material se hace menos elástico y más rígido por la adición de la fibra de cabuya.

En la Figura 3.17 se observa que el material compuesto formulado con cabuya químicamente tratada tiene mayor deformación ya que en el proceso de acetilación se forman mayor cantidad de enlaces uretanos que favorecen a la flexibilidad del material. Según Barra et al. (2006), explica que cuando se presenta una mayor deformación es porque existe una mayor afinidad entre la fibra y la matriz (p. 587). Sin embargo en la Figura All. 19 se observa que el material compuesto con fibra acetilada no difiere estadísticamente del material compuesto con fibra sin acetilar.

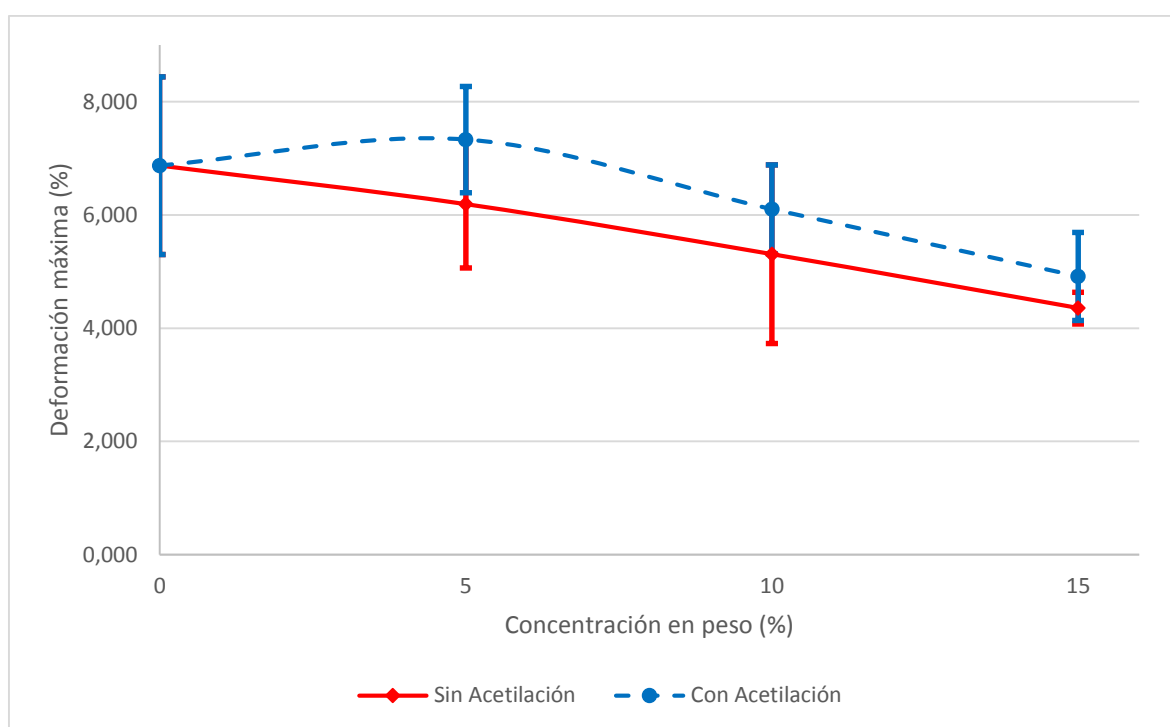


Figura 3.17. Deformación al pico obtenida de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

La deformación al pico aumenta sólo cuando se formula el material con cabuya acetilada con una concentración en peso del 5%, presentó un aumento del 6,70% en relación con el material de poliuretano. Para todos los demás materiales compuestos la deformación al pico disminuye. Cuando se formula el material compuesto con 15% en peso de fibra, se presenta una disminución del 36,56% para la cabuya sin tratamiento químico y una disminución del 28,53% para la cabuya con

tratamiento químico en comparación con el material puro. En la Figura All. 20 se observa que los materiales compuesto con fibra al 10% y 15% difieren estadísticamente del material hecho únicamente de poliuretano.

En la Figura 3.18 se muestra la resistencia a la tracción obtenido en los ensayos de tracción para el material compuesto con cabuya. Independientemente del tratamiento a la fibra o del porcentaje en peso de fibra, todos los materiales compuestos presentaron un incremento en la resistencia a la tracción excepto el material con 10% en peso de cabuya no acetilada. El material formulado con fibra químicamente tratada presenta esfuerzos máximos mayores en comparación con el material formulado con fibra sin tratar químicamente gracias a que el proceso de acetilación ayuda a que se formen mayor cantidad de enlaces de uretano que ayudan a la absorción y distribución de esfuerzo por todo el material. Se concluye que el esfuerzo es transferido en los materiales formulados con fibra químicamente tratada de una manera más eficiente por la mayor presencia de enlaces uretano. Esto concuerda con la Figura All.21 en donde se observa que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los materiales formulados con cabuya químicamente tratada y los materiales compuestos formulados con cabuya sin tratamiento químico.

El mayor resultado alcanzado para el esfuerzo máximo es del material compuesto con una carga en peso de 5% de cabuya acetilada, con un incremento de 36,35% en comparación con el material puro. El material compuesto con 15% en peso de fibra no acetilada presenta el mismo esfuerzo máximo que el material de poliuretano (variación menor al 1%), mientras que el material compuesto con 15% en peso de fibra acetilada presenta un incremento de 16,19% en comparación con el material hecho sólo de poliuretano. En la Figura All. 22 se observa que los materiales compuestos formulados con 10% y 15% en peso de cabuya no presentan una diferencia estadísticamente significativa del material puro en el parámetro de resistencia a la tracción.

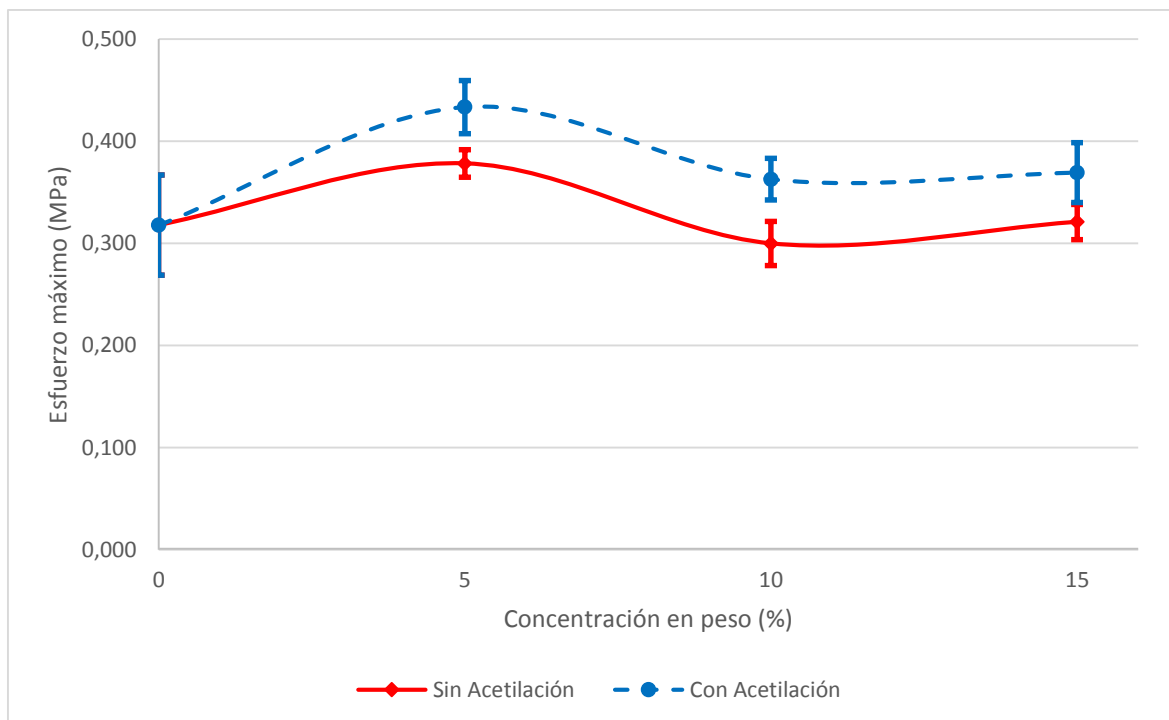


Figura 3.18. Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

El módulo de Young del ensayo de tracción para el material compuesto con cabuya se muestra en la Figura 3.19. Para saber la rigidez de un material se debe conocer el módulo de Young, a mayor valor del módulo el material es más rígido (Hassan et al, 2010, p. 2092). Se observa que los materiales formulados con fibra no acetilada muestran mayores módulos en relación con los materiales formulados con fibra tratada. Consecuencia del proceso de acetilación las cadenas de uretano son más largas con enlaces más flexibles, es por esto que los materiales compuestos con fibra acetilada poseen módulos más bajos (Rozman et al., 2007, p. 2294). Cuando se formula el material con una concentración de 15% en peso de fibra, se obtienen los mayores valores para el módulo de Young. En comparación con el material puro existe un incremento de 58,95% para el material con fibra acetilada y un incremento de 92,08% para el material con fibra sin acetilar. En la Figura All. 23 se observa que el tratamiento es una variable estadísticamente significativa para el módulo de Young. En la Figura All.24 se observa que el material hecho sólo de poliuretano difiere significativamente de los materiales compuestos formulados con distintas concentraciones en peso de cabuya.

Las planchas de poliuretano son usadas en la industria de la construcción y son colocadas en el interior de las paredes, por lo tanto no están expuestas a esfuerzos mecánicos de tracción por lo que el aumento en el módulo de Young no impide que el material sea usado en la industria mencionada.

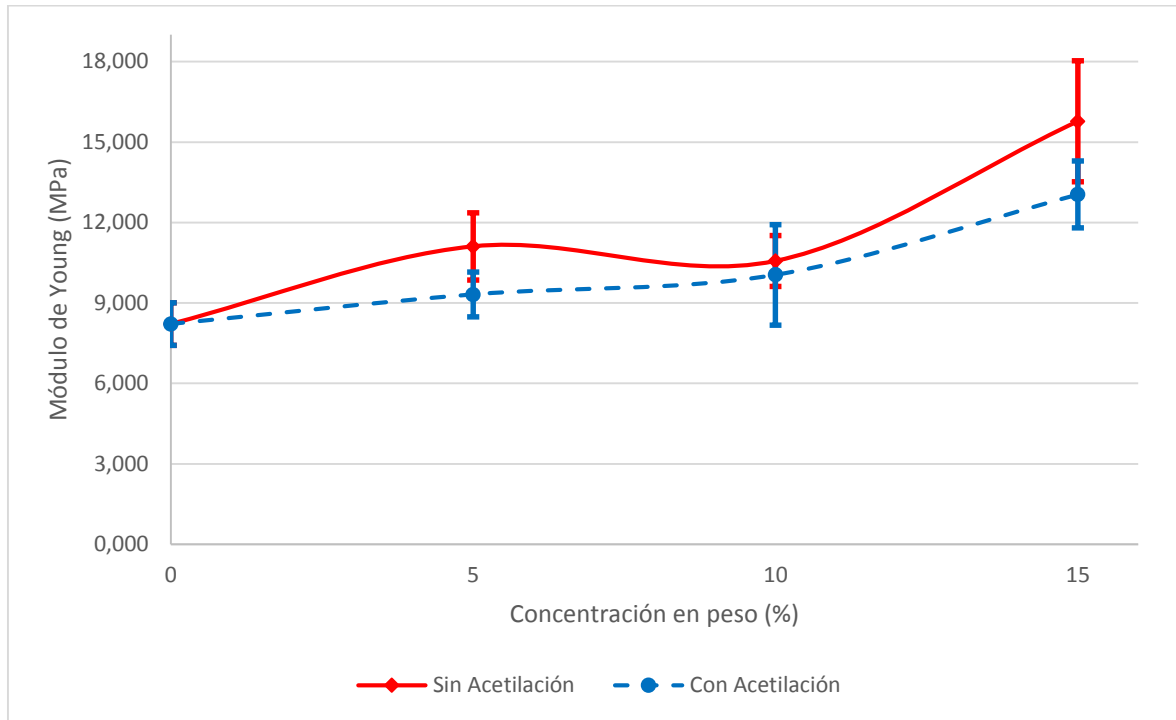


Figura 3.19. Módulo de Young obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya

Se diseñó un modelo estadístico para evaluar el impacto de las variables del presente proyecto (concentración en peso de fibra, tipo de fibra y tratamiento químico a la fibra) sobre los parámetros del ensayo de tracción (desplazamiento máximo, deformación máxima, carga máxima, esfuerzo máximo y módulo de Young). Se utilizó el software Statgraphics se realizó un análisis estadístico ANOVA cuyos resultados se muestran en el Anexo III. Se demuestra que tanto la concentración en peso, el tipo de fibra y el tratamiento químico son factores que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre todos los parámetros del ensayo de tracción con un 95% de nivel de confianza. Esto quiere decir que las variables utilizadas en el proyecto influyen notablemente en las propiedades y características que va a poseer el material compuesto.

- **Comparación de los materiales compuestos con fibra de raquis de palma africana y con fibra de cabuya en el ensayo de tracción**

A continuación se muestran las figuras donde se comparan los parámetros de los ensayos de tracción para los materiales compuestos formulados con los dos tipos de fibra, con y sin tratamiento químico. En la Figura 3.20 se comparan los resultados obtenidos en el parámetro de deformación en el ensayo de tracción para todos los materiales compuestos formulados.

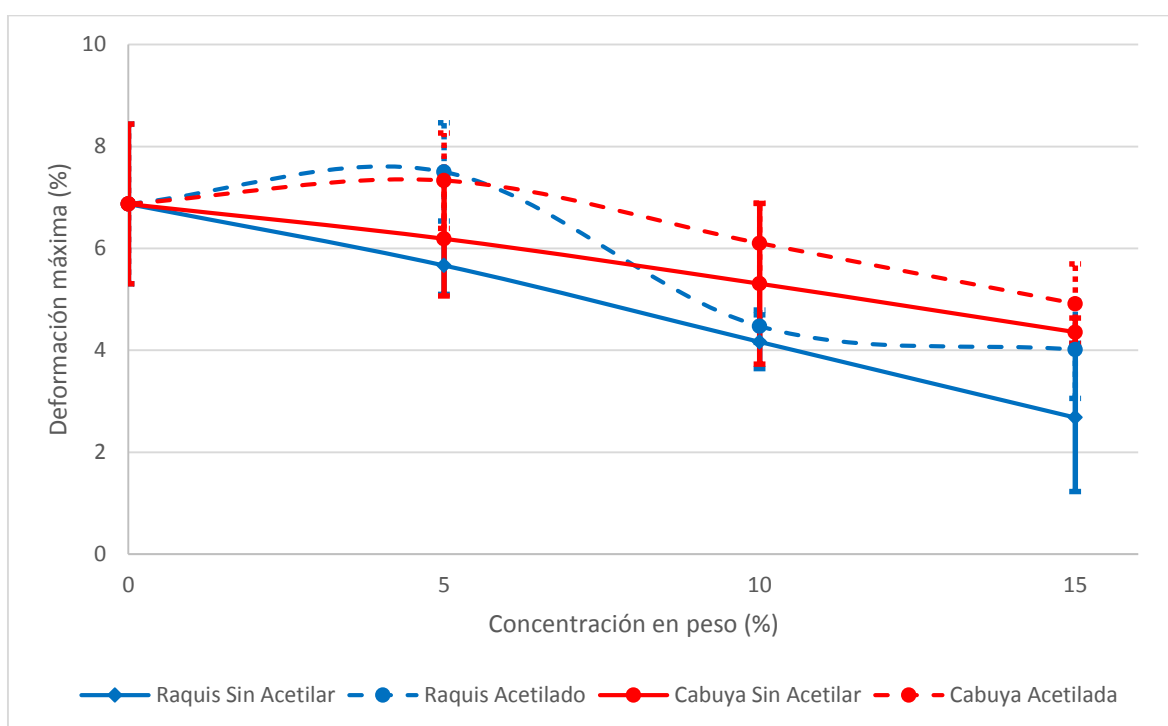


Figura 3.20. Deformación al pico obtenida de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y raquis de palma africana

En la Figura 3.20 se observa que la tendencia es decreciente con el aumento de porcentaje en peso de fibra para todos los materiales desarrollados. Los resultados disminuyen debido a que la incorporación de la fibra aumenta la rigidez del material. Cuando se formula el material con 5% en peso de fibra, los valores de deformación se aproximan al valor presentado por el material puro, mientras que con 10% en peso de fibra la deformación se aleja del valor que presenta el material puro. Cuando se formula el material con 15% en peso de fibra, la deformación presenta su mínimo valor. Los valores más bajos de deformación exhiben los materiales

formulados con 15% en peso con fibra sin tratar. Con el porcentaje en peso de 15% de fibra, si se compara entre los dos tipos de fibra utilizada en este proyecto, se observa que los mayores desplazamientos se obtienen cuando se formula el material con cabuya. Por tanto se deduce que la fibra de cabuya presenta mayor afinidad con la matriz polimérica.

En la Figura 3.21 se comparan los resultados obtenidos en el parámetro resistencia a la tracción para todos los materiales compuestos desarrollados. Los materiales formulados con fibra químicamente tratada presentan resistencia a la tracción más alta que los materiales con fibra sin tratar. Se observa que la resistencia a la tracción aumenta y alcanza su máximo valor con 5% en peso de fibra, mientras que con 10% en peso de fibra decrece su valor. Cuando se usa 15% de fibra la resistencia a la tracción disminuye para el raquis de palma africana y aumenta para la cabuya. Al comparar la resistencia a la tracción entre los dos tipos de fibra, se obtiene mayores resultados cuando se formula el material con fibra de cabuya, por lo tanto la fibra de cabuya absorbe mayor el esfuerzo que se aplique al material.

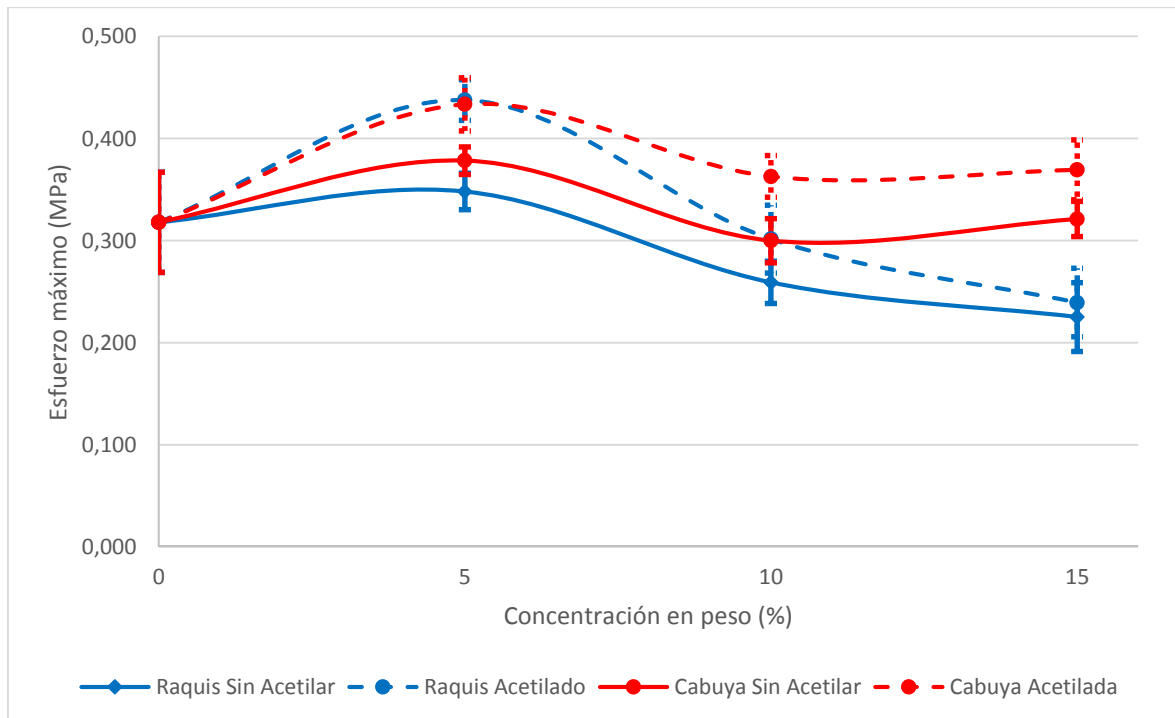


Figura 3.21. Esfuerzo máximo obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y raquis de palma africana

En la Figura 3.22 se comparan los resultados obtenidos en el parámetro de módulo de Young en el ensayo de tracción para todos los materiales compuestos desarrollados. Se observa crecimiento del módulo de Young para todos los materiales en relación con el material puro. El módulo alcanza su valor máximo cuando se formula el material con 15% en peso. Los materiales formulados con fibra sin tratar presentan módulos más altos que los materiales formulados con fibra químicamente tratada, es decir, los materiales con fibra sin tratar son más rígidos. Al comparar los dos tipos de fibra con un porcentaje en peso de 15%, se observa que mayores módulos se obtienen cuando se formula el material con fibra de cabuya. La fibra cabuya posee un módulo mayor que la fibra de raquis, es por esto que la cabuya es capaz de transferir mayor rigidez al poliuretano.

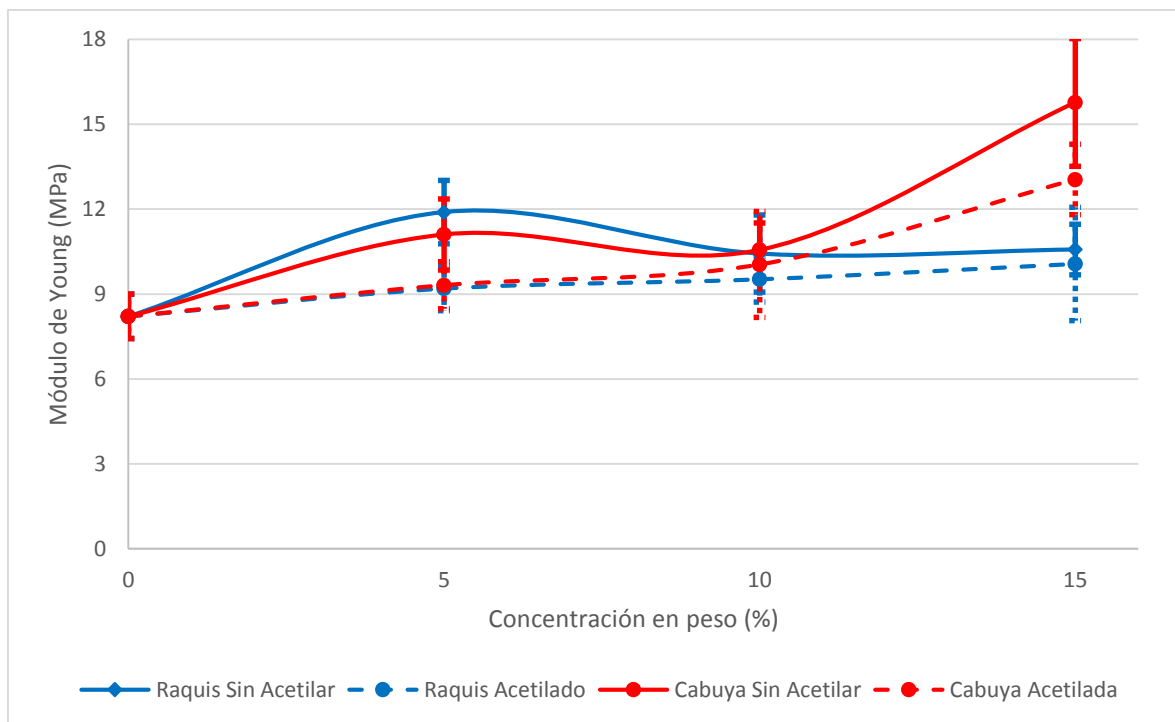


Figura 3.22. Módulo de Young obtenido de los ensayos de tracción al material compuesto de poliuretano rígido con fibra de cabuya y raquis de palma africana

3.3.1.3. Selección de los materiales compuestos formulados

Para el presente proyecto, con base en los ensayos mecánicos, se seleccionó cuatro tipos de materiales cuya concentración de carga en peso presentaron

mayores o iguales resultados que el poliuretano en los parámetros de esfuerzo máximo y módulo: dos materiales compuestos de cabuya (con y sin tratamiento químico) y dos materiales compuestos de raquis de palma africana (con y sin tratamiento químico). A estos cuatro tipos de materiales, además del material hecho sólo de poliuretano, se realizaron las pruebas de densidad y flamabilidad, y la evaluación de las propiedades térmicas y acústicas.

De los ensayos mecánicos se observa que los materiales compuestos formulados con fibra químicamente tratada presentan propiedades de tracción y de flexión superiores debido a las reacciones adicionales producidas por los grupos OH de la fibra tratada con el isocianato. A pesar del aumento en los resultados, la diferencia no es significativa cuando se formula el material con fibra acetilada con respecto a la fibra sin acetilar, por lo que se deduce que el proceso de acetilación no se justifica para el desarrollo del material compuesto de bajo costo. En consecuencia de que el proceso de acetilación aumenta los costos de producción del material compuesto, desde el punto de vista económico, no es conveniente realizarlo ya que el material compuesto formulado con fibra sin tratamiento químico presenta propiedades mecánicas similares.

De los ensayos de flexión se seleccionó el material compuesto cuya concentración de carga en peso de fibra es del 15% ya que los resultados de esfuerzos máximos y módulos de flexión no presentaron una diferencia estadísticamente significativa de los valores que presentó el material de poliuretano. A pesar de que los materiales compuestos con 10% de concentración de carga de fibra presentaron los mayores resultados en los parámetros antes mencionados, éstos no fueron seleccionados ya que el objetivo del proyecto es incorporar la mayor cantidad de fibra sin que las propiedades del poliuretano sean disminuidas, por lo tanto se seleccionó a los materiales compuestos mencionados anteriormente.

Al igual que en el ensayo de flexión, para el ensayo de tracción se tomaron en cuenta los resultados obtenidos para los parámetros de esfuerzo máximo y módulo de Young. Los materiales compuestos presentaron la misma tendencia que en los ensayos de flexión, pero en este caso el material formulado con 5% de fibra

presentó los mayores resultados de esfuerzo máximo y deformación. A pesar de que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el material puro y los material compuestos, se seleccionó al material cuya concentración de carga en peso es del 15% de fibra debido a que presenta resultados similares al del material de poliuretano, se considera también que la adición de una mayor cantidad de fibra favorecería a una disminución de costos de producción del material. Para el material compuesto formulado con una concentración de 15% de fibra, se observó que los resultados del módulo de Young aumentaron en relación con el material puro. Mientras que los resultados de esfuerzo máximo se aproximaron a los resultados presentados por el material hecho sólo de poliuretano.

3.3.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y FLAMABILIDAD DEL MATERIAL COMPUESTO FORMULADO

3.3.2.1. Ensayo de densidad

La Tabla 3.5 muestra los valores de densidad para cada uno de los cuatro materiales compuestos seleccionados en el punto 3.2.1.3 y para el material hecho sólo de poliuretano. Los datos completos obtenidos en el ensayo de densidad son mostrados en el Anexo V.

En la Tabla 3.5 se muestra que la densidad del material rígido de poliuretano tiene un valor de 42,971 kg/m³ mientras que la hoja técnica del producto indica un valor de 40 kg/m³, por lo que se demuestra que el material obtenido en el presente proyecto posee una densidad muy próxima al valor bibliográfico. Los resultados indican que los materiales compuestos desarrollados presentan un aumento de densidad en comparación con el material puro. Esto se debe a que las fibras naturales son más pesadas que el material de poliuretano. Las densidades de las fibras utilizadas en el presente proyecto, como se muestran en la Tabla 1.2, son de 1 100 kg/m³ para el raquis de palma africana y 1 300 kg/m³ para la cabuya.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos para el ensayo de densidad para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Material	Densidad 1 (kg/m ³)	Densidad 2 (kg/m ³)	Densidad 3 (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)
Poliuretano	43,334	43,022	42,556	42,971 (S _x = 0,392)
Raquis 15% sin acetilación	61,247	63,813	62,612	62,557 (S _x = 1,284)
Raquis 15% con acetilación	62,606	64,520	62,196	63,107 (S _x = 1,241)
Cabuya 15% sin acetilación	66,364	67,536	67,242	67,047 (S _x = 0,610)
Cabuya 15% con acetilación	66,567	67,600	68,319	67,495 (S _x = 0,881)

En la Figura 3.23 se comparan los resultados de las densidades cuando se formula el material con fibra químicamente tratada con respecto al material formulado con fibra sin tratar.

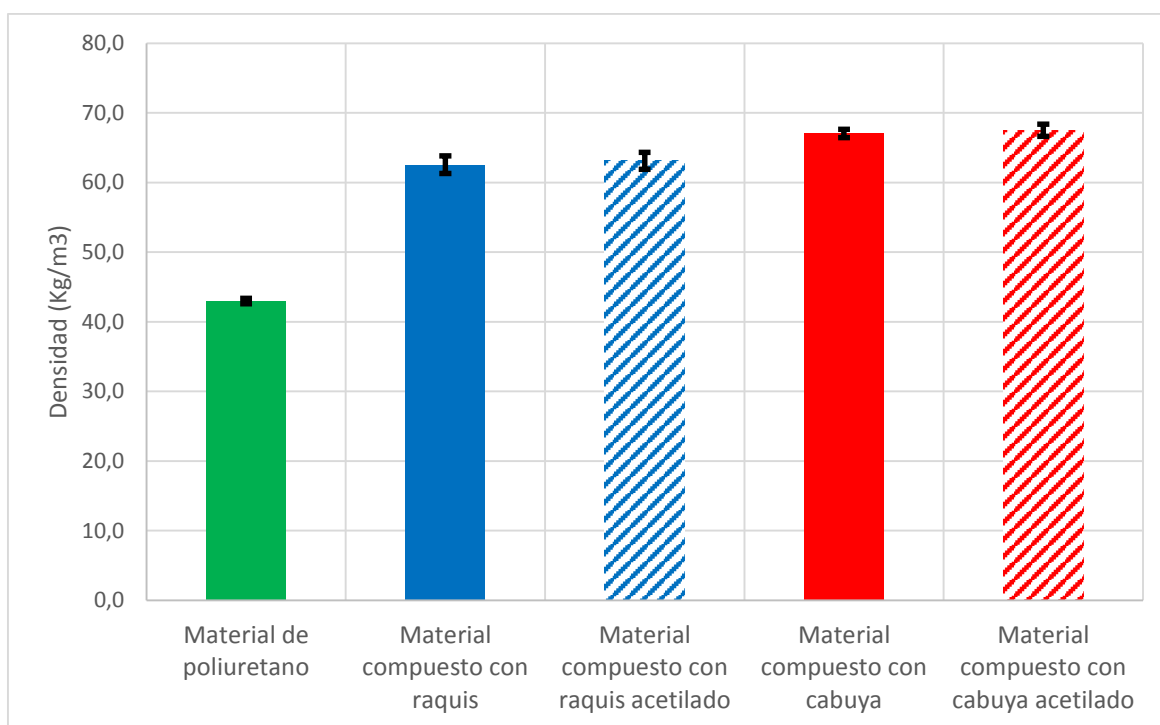


Figura 3.23. Densidad de los materiales compuestos de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

En la Figura 3.23 se observa que la diferencia de la densidad entre estos materiales es mínima. La variación de la densidad que se presenta entre los materiales compuestos formulados con los dos tipos de fibra está relacionada directamente por la densidad propia de cada fibra, como la cabuya es más densa que el raquis de palma africana, el material compuesto de cabuya posee mayor densidad que el material compuesto de raquis de palma africana. En la industria de la construcción la espuma de poliuretano que es utilizada como aislamiento térmico posee una densidad entre 30 y 60 kg/m³. El requisito para que una espuma de poliuretano sea usada es esta industria es que la densidad de la espuma no sea inferior a 30 kg/m³ (Atepa, 2010, p. 41). Por lo tanto el material desarrollado cumple con el estándar de densidad establecido y puede ser utilizado en dicha industria.

3.3.2.2. Análisis de flamabilidad

En la Tabla 3.6 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de flamabilidad, donde se indican los valores promedios de: tiempo de duración de la llama, longitud de quemado, velocidad lineal de combustión y las observaciones que existieron cuando se expuso el material a la llama. En el Anexo VI se encuentran detallados los resultados obtenidos de las 10 probetas ensayadas para cada tipo de material.

De los resultados obtenidos se observa que la velocidad lineal de combustión es menor cuando el material es hecho sólo de poliuretano. El poliuretano utilizado para el presente proyecto es formulado con agentes retardantes a la llama por lo que en el ensayo realizado, el 80% de las probetas de poliuretano no llegaron a la primera marca de los 25 mm porque al retirar el mechero la llama se extinguía en ese instante. Pese a que Singh (2009), indica que a mayor densidad del poliuretano menor será la velocidad de combustión, para el presente proyecto los materiales compuestos presentan un comportamiento totalmente distinto debido a que las fibras naturales no son ignífugas. Es por esto que se observa que los materiales compuestos poseen una mayor velocidad de combustión que el material puro.

Tabla 3.6. Resultados obtenidos para el ensayo de flamabilidad para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Material	Tiempo promedio (s)	Longitud promedio de quemado (mm)	Velocidad promedio de combustión (mm/min)	Observaciones
Poliuretano	4,2	5,0	72,2	No se presenta goteo. Humo negro y llama anaranjada. La llama se extingue. No sobrepasa la marca de 100 mm. Ocho probetas no llegaron a la marca de 25 mm.
Raquis 15% sin acetilación	7,2	11,5	94,4	No se presenta goteo. Humo negro y llama anaranjada-amarillenta. La llama se extingue. No sobrepasa la marca de 100 mm. Seis probetas llegaron a la marca de 25 mm.
Raquis 15% con acetilación	3,8	8,9	144,7	No se presenta goteo. Humo negro y llama amarilla. La llama se extingue. No sobrepasa la marca de 100 mm. Todas las probetas llegaron a la marca de 25 mm.
Cabuya 15% sin acetilación	5,5	7,7	82,3	No se presenta goteo. Humo negro y llama anaranjada-amarillenta. La llama se extingue. No sobrepasa la marca de 100 mm. Seis probetas llegaron a la marca de 25 mm.
Cabuya 15% con acetilación	8,0	15,3	113,3	No se presenta goteo. Humo negro y llama anaranjada. La llama se extingue. No sobrepasa la marca de 100 mm. Nueve probetas llegaron a la marca de 25 mm.

En la Figura 3.24 se observa que el material formulado con raquis acetilado presenta la mayor velocidad de combustión, es decir, este material es el que se quema más rápidamente en caso de ser expuesto a la llama. Mientras que el material formulado con cabuya sin tratamiento químico es el material con mejores propiedades ignífugas. En comparación cuando se formula el material compuesto con fibra químicamente tratada y con fibra sin tratar, se observa que la velocidad lineal de combustión es mayor cuando se utiliza fibra acetilada como consecuencia del uso de anhídrido acético el cual es un reactivo inflamable.

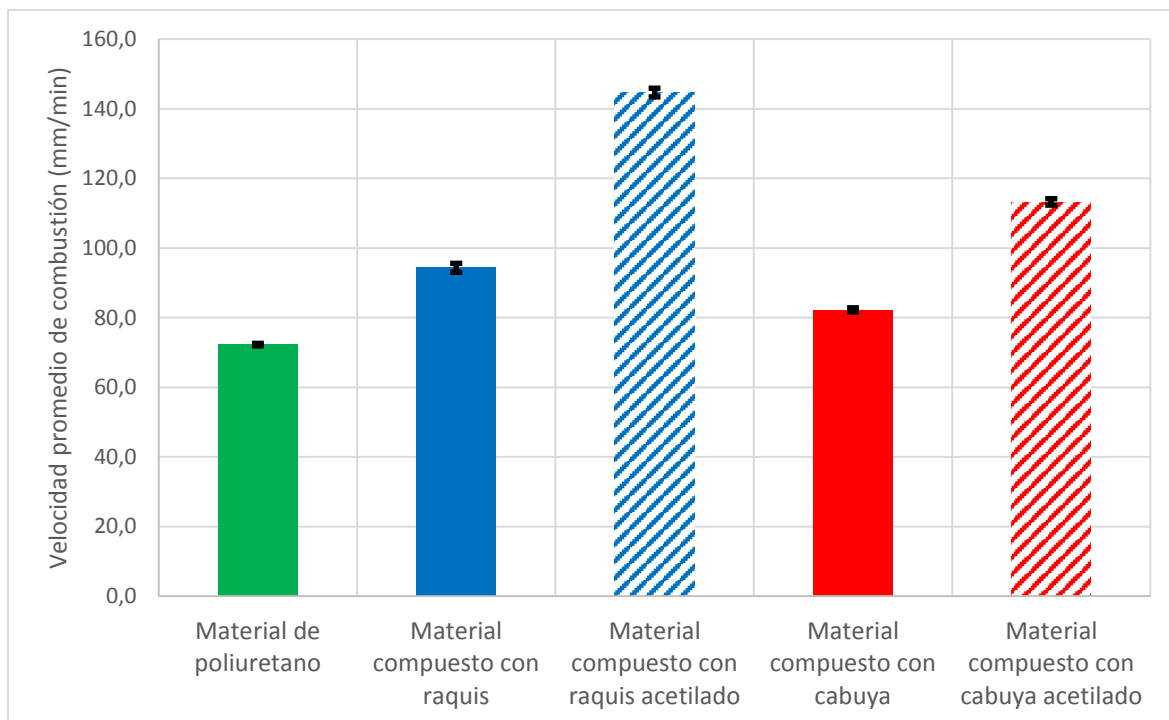


Figura 3.24. Velocidad de combustión de los materiales compuestos de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Hay que recalcar que ninguno de los materiales compuestos alcanzó la segunda marca de los 100 mm (en algunos casos la llama alcanzó longitudes máximas de 50 mm), al retirar el mechero la llama perdía intensidad y se extinguía lentamente, lo que indica que el material compuesto conserva la característica ignífuga propia del poliuretano pero en menor intensidad. Por lo que este material también es apto para ser utilizado como revestimiento en las edificaciones ya que se quema con dificultad.

3.3.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y ACÚSTICAS DEL MATERIAL COMPUESTO FORMULADO

3.3.3.1. Análisis de las propiedades térmicas

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados calculados de los coeficientes de conductividad térmica para los distintos tipos de materiales. En el Anexo VII se

muestran los datos obtenidos de dicho ensayo y el procedimiento para calcular el coeficiente.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos del coeficiente de conductividad térmica (k) para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Material	k_1 (W/mK)	k_2 (W/mK)	k_3 (W/mK)	Promedio (W/m K)
Poliuretano	0,291	0,280	0,287	0,286 ($S_x = 0,005$)
Raquis 15% sin acetilación	0,307	0,303	0,266	0,292 ($S_x = 0,022$)
Raquis 15% con acetilación	0,304	0,280	0,303	0,296 ($S_x = 0,013$)
Cabuya 15% sin acetilación	0,303	0,303	0,277	0,295 ($S_x = 0,015$)
Cabuya 15% con acetilación	0,321	0,326	0,299	0,315 ($S_x = 0,015$)

Lo que se busca con el análisis térmico es determinar la variación del coeficiente de conductividad del material compuesto con respecto al material puro. Se espera que el coeficiente no aumente considerablemente ya que eso perjudica a la propiedad de aislante térmico, la cual es una de las propiedades más importantes que presenta el poliuretano rígido.

Los resultados obtenidos no se encuentran acordes a los datos de bibliografía presentados por Atepa (2010), quien dice que el poliuretano usado en la construcción para aislamientos presenta un coeficiente térmico de conducción igual a 0,028 (W / mK) (p. 10). Debido que para este ensayo se utilizó un equipo didáctico de laboratorio, dicho equipo presentaba limitaciones para llegar a altas temperaturas que impiden el cálculo real del coeficiente. Sin embargo, el ensayo sirvió como un método de comparación para determinar si los materiales compuestos con fibra natural mantienen o pierden la capacidad de aislamiento térmico propio del poliuretano.

En la Figura 3.25 se encuentran representados los coeficientes de conductividad térmica de los materiales desarrollados. Se observa que el material puro posee el

menor coeficiente de conductividad térmica, por lo que se concluye que el material de poliuretano es el que presenta las mejores propiedades térmicas. Respecto a los materiales compuestos se muestra que el coeficiente no se encuentra muy alejado al valor que presenta el material puro. Se observa que los materiales formulados con fibra químicamente tratada presentan un aumento del coeficiente de conductividad térmica haciendo del proceso de acetilación innecesario si el propósito del material compuesto es la fabricación de paneles para aislantes térmicos. En la Figura AVII. 1 se observa que el tratamiento químico no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el coeficiente de conductividad térmica. Y en la Figura AVII. 2 se observa que el material compuesto con fibra de raquis de palma africana no presenta una diferencia estadísticamente significativa con el material hecho únicamente de poliuretano, por lo que el material compuesto con fibra de raquis presenta características similares de aislante acústico a las que presenta el material de poliuretano.

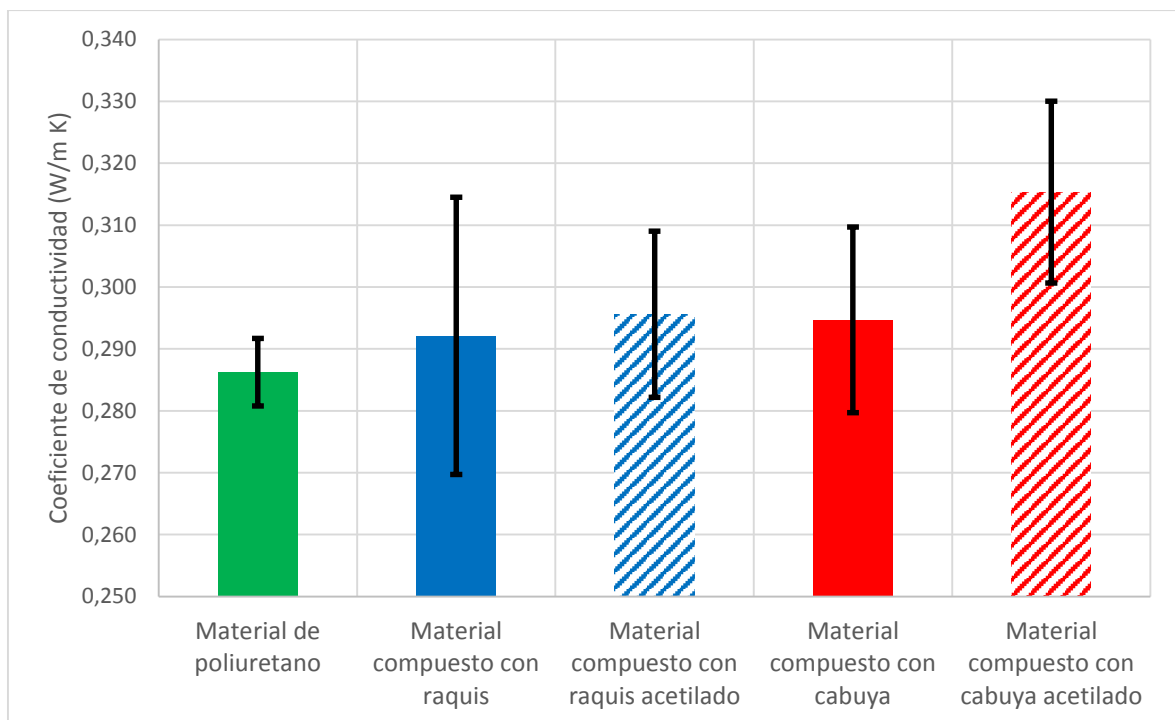


Figura 3.25. Coeficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

La conductividad térmica depende de la densidad y del tamaño de las celdas del material, la conductividad se incrementa con el incremento de la densidad o si se

aumenta el tamaño de las celdas del poliuretano (Almanza, Rodríguez y Saja, 2004, p. 1230). Es por esto que los materiales compuestos obtenidos, los cuales tienen mayor densidad, presentan un incremento en el valor del coeficiente de conductividad térmica.

El material compuesto con fibra de raquis de palma africana sin acetilar presenta un aumento de 2,1% mientras que el material formulado con cabuya acetilada presenta un aumento de 10,1% en comparación con el material de poliuretano. Según Atepa (2010) el coeficiente de conductividad térmica debe presentar una variación que no sobrepase el 15% del valor establecido como estándar. En el presente proyecto la variación se encuentra dentro de los límites, por lo tanto se demuestra que el material compuesto con fibra de raquis de palma africana puede ser usado también como aislantes térmicos en la industria de la construcción o en la tecnología de la refrigeración.

3.3.3.2. Análisis de las propiedades acústicas

El análisis de las propiedades acústicas se realizó con la finalidad de comparar la característica como aislante acústico del poliuretano con respecto al material desarrollado, para determinar si el material compuesto desarrollado es útil para su uso como aislante acústico en la industria de la construcción.

Para este análisis se compararon las pérdidas por transmisión de los distintos materiales, entendiéndose por pérdidas por transmisión a la medida que indica la reducción del nivel de ruido que consigue el material cuando lo atraviesa una onda sonora. Las pérdidas por transmisión fueron calculadas a partir de la diferencia del nivel de presión sonora entre la fuente y el material confinado. A mayor valor de pérdida por transmisión, el material presenta mayor atenuación al ruido.

En la Tabla 3.8 se muestran las pérdidas por transmisión del análisis en bandas de octava de los distintos materiales compuestos desarrollados. En el Anexo VIII se muestran de manera detallada los niveles de presión sonora obtenidos para cada

material en bandas de octava. También en el Anexo VIII se muestra la pérdida por transmisión calculada con base en las propiedades físicas del material.

Tabla 3.8. Pérdidas por transmisión (dB) medida para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Bandas Material	31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
Poliuretano	0,5	2,5	2,8	2,7	3,0	7,0	13,3	19,1	20,6	21,4
Raquis 15% sin Acetilación	0,1	0,5	0,4	0,1	4,2	7,7	14,0	20,4	23,6	23,1
Raquis 15% con Acetilación	0,5	0,1	0,2	0,0	4,6	8,4	14,2	21,3	22,9	23,2
Cabuya 15% sin Acetilación	0,7	0,5	1,0	0,6	4,9	9,8	15,4	21,1	24,1	23,9
Cabuya 15% con Acetilación	0,5	3,5	3,8	5,1	5,1	10,2	16,6	23,1	23,0	24,1

En la Figura 3.26 se comparan los resultados de pérdidas por transmisión obtenidos para los materiales desarrollados. Lamancusa (2010), establece que existe un mejor aislamiento acústico por parte del material cuando hay un mayor valor de las pérdidas por transmisión (p. 93), por lo que el material compuesto obtenido es mejor aislante a altas frecuencias.

En la Figura 3.26 se puede observar que a bajas frecuencias se presentan pequeños valores de pérdidas por transmisión y no poseen una tendencia de crecimiento lineal. Esto se debe a que en dichas frecuencias las longitudes de onda son muy altas por lo que son difíciles de receptor por el sonómetro. Además, se establece que existe mayor atenuación al ruido cuando mayor es la frecuencia debido a que las longitudes de onda son más fáciles de receptor porque son más cortas. Por otro lado, si se compara las pérdidas por transmisión entre los

materiales formulados con fibra natural y el material hecho sólo de poliuretano, se observa que las pérdidas por transmisión son mayores en los materiales compuestos, por lo tanto los materiales compuestos muestran mayor atenuación al ruido. Esto es debido a que los materiales que poseen mayor densidad presentan mayor capacidad para aislar el sonido (Giménez, 2013, p.153).

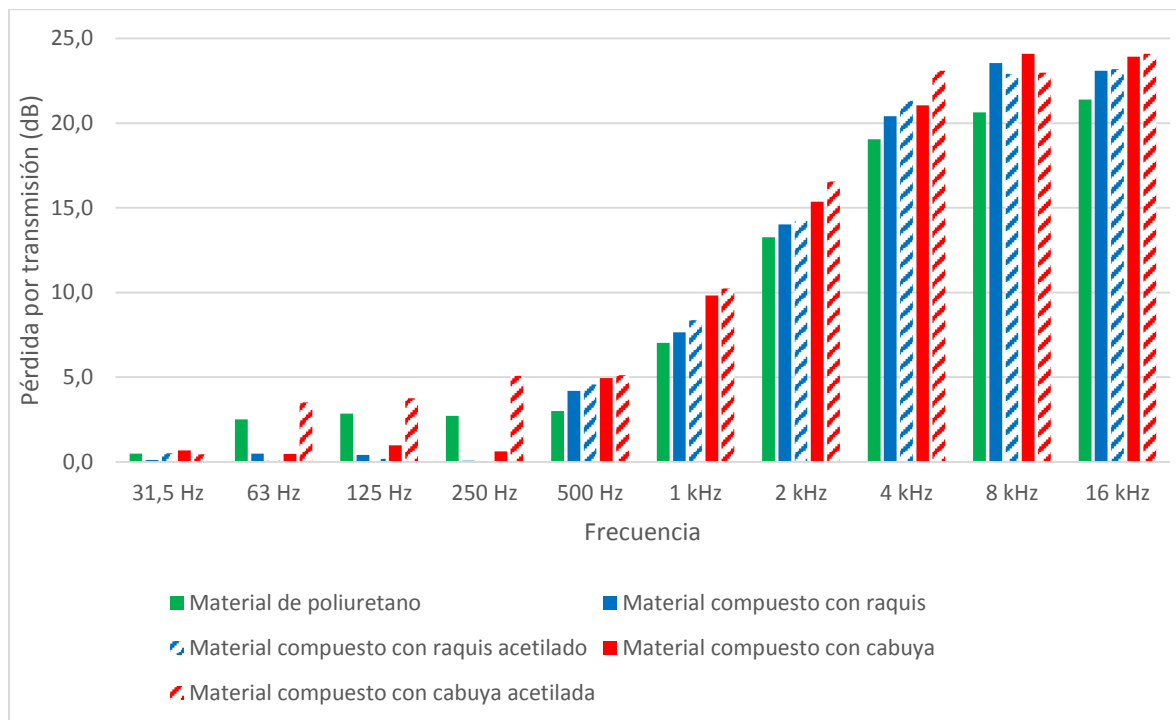


Figura 3. 26. Pérdidas por transmisión medidas (dB) para el material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Si se compara las pérdidas de transmisión con bibliografía (ANEXO IX), se observa que también para varios materiales las pérdidas por transmisión presentan valores pequeños a bajas frecuencias, y viceversa. Esto indica que el aislamiento es más eficiente para sonidos agudos (altas frecuencias). Al comparar los resultados de la Tabla 3.8 (material compuesto con mejores resultados) con los datos del Anexo IX, se observa que el material compuesto con cabuya acetilada presenta valores de pérdidas por transmisión similares al que presenta el aglomerado de madera, tal como lo muestra la Figura 3.27.

Se concluye entonces que el material compuesto desarrollado es mejor aislante acústico que el material hecho sólo de poliuretano. Sin embargo, en comparación

con otros materiales (madera sólida, ladrillo enlucido o losa hormigón, como se muestra en el Anexo IX) su condición como aislante es menos efectiva. Por lo tanto, el material compuesto desarrollado no es apto para el uso como aislante para ruido en la industria de la construcción.

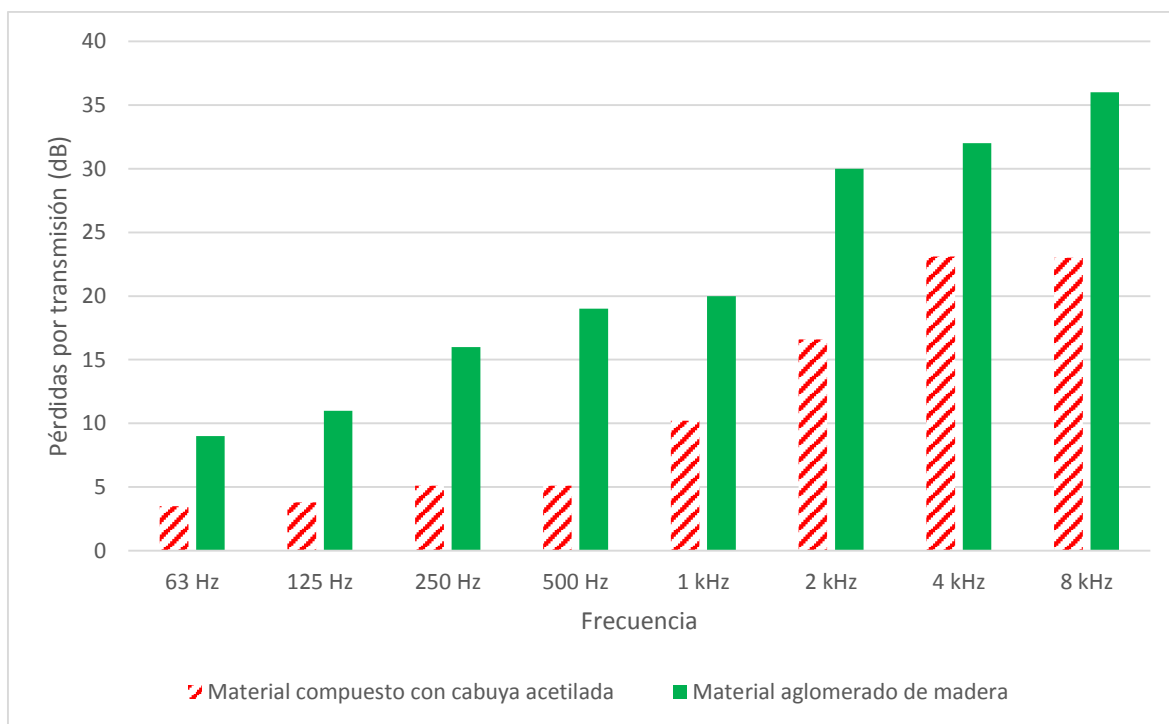


Figura 3. 27. Pérdidas por trasmisión medidas (dB) para el material compuesto con cabuya acetilada y material aglomerado de madera

3.3.3.3. Resultados del análisis de costos de producción de un material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya y con raquis de palma africana

En la Tabla 3.9 se enlistan los costos de la materia prima para la producción de un lote de 1 000 kg del material de poliuretano rígido

En la Tabla 3.10 se detallan los costos de materia prima para la producción de un lote de 1 000 kg de material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya y con fibra de raquis de palma africana. El análisis de costos se realizó para la producción de un material compuesto con 15% en peso de fibra.

Tabla 3.9. Costos de materia prima para la producción de material de poliuretano rígido

Designación de la materia prima	Costo de la materia prima	Cantidad de materia prima por lote	Costo de materia prima por lote
Poliol (kg)	\$ 4,50	476,00	\$2 142,00
Isocianato (kg)	\$ 4,50	524,00	\$2 358,00
	Total	1 000,00	\$4 500,00

Tabla 3.10. Costos de materia prima para la producción del material compuesto de matriz poliuretano rígido reforzado con fibra natural

Designación de la materia prima	Costo de la materia prima	Cantidad de materia prima por lote	Costo de materia prima por lote
Fibra de cabuya (kg)	\$ 0,40	150,00	\$ 60,00
Fibra de raquis de palma africana (kg)	-	150,00	\$ 0,00
Poliol (kg)	\$ 4,50	404,75	\$ 1 821,38
Isocianato (kg)	\$ 4,50	445,25	\$ 2 003,62

En la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 se puntualizan los costos de preparación de las fibras naturales, raquis de palma africana y cabuya respectivamente. Estos costos se refieren al consumo energético que se gasta para la molienda, tamizado y secado de 150 kg de fibra necesaria para la producción de un lote de 1 000 kg de material compuesto. La diferencia de los costos de obtención entre las dos fibras radica en el gasto en transporte. La fibra de raquis de palma africana es traída desde las plantas extractoras de aceite, ubicadas en la ciudad de Quevedo, hasta la ciudad de Quito. Mientras que la fibra de cabuya es traída desde la ciudad de Ibarra.

En el Anexo X se explica los costos en el mercado de las materias primas del material compuesto desarrollado. Además se especifican los equipos utilizados con su respectivo consumo energético para la preparación de la fibra. Por último, se describen los costos de transporte que implica trasladar la fibra desde su lugar de origen hasta la ciudad de Quito.

Tabla 3.11. Costo de preparación de la fibra de raquis de palma africana

Designación del insumo	Costo unitario	Cantidad de materia prima por lote	Costo de materia prima por lote
Energía eléctrica (kW)	\$ 0,10	17,05	\$ 1,71
Transporte (kg)		150	\$ 60,00
		Total	\$ 61,71

Tabla 3.12. Costo de preparación de la fibra de cabuya

Designación del insumo	Costo unitario	Cantidad de materia prima por lote	Costo de materia prima por lote
Energía eléctrica (kW)	\$ 0,10	17,05	\$ 1,71
Transporte (kg)		150	\$ 45,00
		Total	\$ 46,71

En la Tabla 3.13 se detalla el costo real para producir un lote de 1 000 kg de material compuesto de matriz de matriz de poliuretano rígido reforzado con 15% en peso de fibras naturales.

Tabla 3.13. Costos de producción del material compuesto de matriz poliuretano rígido reforzado con fibra natural

Material	Costo total de producción
Poliuretano	\$ 4 500,00
Compuesto con 15% en peso de raquis	\$ 3 886,71
Compuesto con 15% en peso de cabuya	\$ 3 931,71

En la Tabla 3.13 se observa que el material de poliuretano es el más caro de producir, mientras que el material compuesto con 15% en peso de cabuya es el más barato para producir. Esto se debe a que el costo de transporte de la fibra de cabuya es más económico que el transporte de la fibra de raquis de palma africana. Para la producción del material compuesto de raquis de palma africana existe una disminución de costos del 16%, y para la producción del material compuesto de

cabuya existe una disminución de costos del 14,5%. Por lo tanto la incorporación de fibra natural en la matriz de poliuretano rígido produjo una reducción de costos de producción del material.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se desarrollaron cuatro tipos de materiales compuestos: el primero fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya, el segundo fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de cabuya químicamente tratada, el tercero fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de raquis de palma africana y el cuarto fue un material de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra de raquis de palma africana químicamente tratada. Las concentraciones de carga en peso de fibra utilizadas fueron: 5%, 10% y 15%.
- Para el desarrollo del material compuesto de matriz de poliuretano reforzado con fibra, se debe trabajar con las siguientes condiciones: relación en peso poliol:isocianato igual a 1:1,1. Las paredes internas del molde deben estar a 50°C. Con un tiempo de moldeo de 15 minutos.
- El material formulado con 10% en peso de fibra presentó las mayores propiedades mecánicas en los ensayos de flexión. El material formulado con 5% en peso de fibra presentó las mayores propiedades mecánicas en los ensayos de tracción.
- En la evaluación de las propiedades mecánicas, tanto de flexión y tracción, los resultados en los parámetros de esfuerzo máximo y módulo del material formulado con 15% en peso son similares a los que presenta el material de poliuretano rígido.
- En los ensayos mecánicos el tipo de fibra estadísticamente no influye. La concentración en peso de fibra y el tratamiento químico son las variables que influyen significativamente en los resultados del ensayo de flexión.

- En el ensayo de tracción las variables: concentración en peso de fibra, tipo de fibra y tratamiento químico tienen un efecto estadísticamente significativo. El material formulado con fibra acetilada presenta resultados mayores a los presentados por el material formulado con fibra sin tratamiento químico en los ensayos de propiedades mecánicas.
- El material compuesto desarrollado presentó mayor densidad en comparación con el material puro. El material compuesto con fibra de cabuya es más denso que el material compuesto con fibra de raquis de palma africana. Los valores de densidad entre un material con fibra tratada y uno con fibra sin tratar no varían significativamente. El material compuesto desarrollado cumple con los estándares de densidad para ser usado en la industria de la construcción.
- Los materiales compuestos tienen una mayor velocidad de combustión que el material hecho sólo de poliuretano. Los materiales compuestos con fibras acetiladas presentaron las mayores velocidades de combustión, debido al uso del anhídrido acético para el tratamiento de las fibras. A pesar del aumento en la velocidad de combustión los materiales compuestos presentan buenas características ante la llama, por lo que el material desarrollado es apto para ser utilizado como revestimiento en las edificaciones.
- El material compuesto con fibra de raquis de palma africana no presenta una diferencia estadísticamente significativa con el material hecho únicamente de poliuretano, lo que hace posible el uso del material compuesto con fibra de raquis en la industria de la construcción o en la tecnología de la refrigeración.
- Para frecuencias superiores a 500 Hz, los materiales compuestos de poliuretano con fibra natural logran atenuar mejor el ruido en comparación con el material hecho de poliuretano. Sin embargo, el material compuesto no

presentó las condiciones necesarias para ser usado en la industria de la construcción como aislante acústico.

- Se presentó una disminución de costos para la producción del material compuesto de matriz de poliuretano rígido reforzado con fibra natural en comparación con el material hecho sólo de poliuretano. Existió una disminución de costos del 16% cuando se utilizó fibra de raquis de palma africana, y una disminución de costos del 14,5% cuando se utilizó fibra de cabuya.

4.2. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis económico más profundo, dicho análisis deberá incluir indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) que facilitan la evaluación económica.
- Realizar una microscopía electrónica de barrido para estudiar detalladamente la estructura y morfología del material compuesto desarrollado. Además, observar la diferencia de cómo se encuentra estructurado el material compuesto con fibras químicamente tratadas y sin previo tratamiento químico.
- Realizar un tratamiento químico a las fibras usando isocianatos para que aumente la compatibilidad de las fibras con la matriz de poliuretano y resulte en una fuerte unión interfacial fibra-matriz, además de mejorar la dispersión de las fibras en la matriz. Mohebbi y Hajihassani (2010) utilizaron diisocianato de hexametileno HDI y diisocianato de tolueno TDI (p. 159), por lo que se recomienda los agentes acetilantes mencionados.
- Realizar el análisis de las propiedades térmicas, el cual fue explicado en este proyecto, pero utilizando un equipo que permita obtener el valor real del

coeficiente de conductividad térmica del poliuretano y se pueda comparar con los valores de conductividad de los materiales desarrollados.

- Realizar un análisis térmico mecánico dinámico que permita estudiar las propiedades mecánicas a diferentes temperaturas del material compuesto desarrollado. Dependiendo del uso final del material compuesto, este análisis puede ser útil para el estudio de la estructura y las variaciones de las propiedades del material.
- Realizar pruebas de degradación acelerada para observar la influencia de la fibra en la durabilidad del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almanza, O., Rodríguez-Pérez, M. y De Saja, J. (2004). Applicability of the transient plane source method to measure the thermal conductivity of low density polyethylene foams. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(7), 1226-1234.
2. Amin, M., Anuar, K., y Haji Badri, K. (2007). Palm-based bio-composites hybridized with kaolinite. *Journal of Applied Polymer Science*, 105(5), 2488-2496.
3. Arroyo, C. y Loyo, C. (2015). *Diseño de una planta para la producción de domos de polimetilmetacrilato y baldosas de resina poliéster insaturada reforzados con la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas*. (Proyecto de titulación previo a la obtención de Ingeniero Químico publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
4. Askeland, D y Phulé, P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (4ta. Ed.). Mexico: International Thomson Editores, S. A.
5. ASTM C 518. (2010). *Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus*. Estados Unidos.
6. ASTM D 635. (2006). *Standard test method for rate burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position*. Estados Unidos.
7. ASTM D 1622. (2014). *Standard test method for apparent density of rigid cellular plastics*. Estados Unidos.

8. ASTM D 3039. (2014). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. Estados Unidos.
9. ASTM D 7264. (2007). *Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials*. Estados Unidos.
10. ATEPA Asociación Técnica del Poliuretano Aplicado. (2010). *Guía de ventajas y soluciones de espuma rígida de poliuretano proyectado para aislamiento térmico, acústico e impermeabilización*. Recuperado de <http://www.atepa.org/PUR.pdf> (Mayo, 2015)
11. Badri, K., Amin, M., Othman, Z., Manaf, H., y Khalid, N. (2006). Effect of fillerto-matrix blending ratio on the mechanical strength of palm-based biocomposite boards. *Polymer international*, 55(2), 190-195.
12. Barba, J. y Tituana, R. (2014). *Diseño y construcción de un equipo para transferencia de calor por conducción para materiales no metálicos para el laboratorio de transferencia de calor*. (Proyecto de titulación previo a la obtención de título de Ingeniero Mecánico publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
13. Barra, G., Fredel, M., Al.Qureshi, H., Taylor, A., y Clemenceau, C. (2006). Properties of chemically treated natural amorphous silica fibers as polyurethane reinforcement. *Polymer composites*, 27(5), 582-590.
14. Bledzki, A., Mamun, A., Lucka-Gabor, M., y Gutowski, V. (2008). The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites. *Express Polymer Letters*, 2(6), 413-422.
15. Bledzki, A., Zhang, W., y Chate, A. (2005). Natural-fibre-reinforced polyurethane microfoams. *Composites Science and Technology*, 61(16), 2405-2411.

16. Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction* (3ra. Ed.). New York, Estados Unidos: Wiley.
17. Chung, D. (2010). *Composite Material: Science and Applications*. (2da. Ed.). Nueva York. Estados Unidos: Series Editor
18. Cristaldi, G., Latteri, A., Recca, G., y Cicala, G. (2010). Composites based on natural fibre fabrics. *Woven fabric engineering*. Recuperado de <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12253.pdf> (Mayo, 2015)
19. Distrito Metropolitano de Quito, (2008). *Resolución No. 002-SA-2008: Normas Técnicas Ambientales de la Ordenanza Municipal N° 213* (Prevención y Control del Medio Ambiente). Quito, Ecuador.
20. Esteban, A. (2012). Aislamiento acústico. *Pérdidas por transmisión típicas de distintos materiales*, Madrid, España. Recuperado de: elruido.com/divulgacion/curso/acondicionamiento/TABLA43.htm
21. El-Shekeil, Y., Sapuan, M., Khalina, A., Zainudin, E., y Al.Shuja, M. (2012). *Effect of alkali treatment on mechanical and thermal properties of Kenaf fiber-reinforced thermoplastic polyurethane composite*. doi: 10.1007/s10973-012-2258-x
22. Fam, A., y Sharaf, T. (2010). Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations. *Composite Structures*, 92(12), 2927-2935.
23. Giménez, de Paz J. (2013). *Ingeniería acústica para estudiantes y profesionales en higiene y seguridad. Propiedades del ruido y su control*. (1ra. Ed.). Buenos Aires, Argentina: Giménez de Paz Ediciones.

24. Gnauck, B. y Fründt, P. (2007). *Iniciación a la química de los plásticos*. (4ta Edición). Barcelona, España: Hanser, Barcelona.
25. Hassan, A., Salema, A. A., Ani, F. N., y Bakar, A. A. (2010). A review on oil palm empty fruit bunch fiber-reinforced polymer composite materials. *Polymer Composites*. doi:10.1002/pc.21006
26. Hepburn, C. (2012). *Polyurethane elastomers*. (2da Ed.). Londres, Inglaterra: Springer Science & Business Media.
27. Herrera-Franco, P. J., y Valadez-Gonzalez, A. (2004). Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 35(3), 339-345.
28. Hill, C. y Abdul Khalil, H. (2000). Effect of fiber treatments on mechanical properties of coir or oil palm fiber reinforced polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 78(9), 1685-1697.
29. Huntsman, Polyurethanes Group. (2007). *Hoja Técnica de la Mezcla de Polioli Formulado: RUBITHERM LP 18401*. Recuperado de: <http://www.vitrofibras.com/imagenes-productos/HT%20RUBITHERM%2018470%20VF.pdf> (Febrero, 2015).
30. Husić, S., Javni, I., y Petrović, Z. S. (2005). Thermal and mechanical properties of glass reinforced soy-based polyurethane composites. *Composites Science and Technology*, 65(1), 19-25.
31. Hylton, D. (2004). *Understanding plastics testing*. (1ra. Ed.). Munich, Alemania: Hanser Verlag GmbH & Co. Munich.
32. Incropera, F. P., y De Witt, D. P. (2007). *Fundamentos de transferencia de calor*. (6ta. Ed.) Nueva Jersey, Estados Unidos: Pearson Educación.

33. Johnson, M. y Shivkumar, S. (2004). Filamentous green algae additions to isocyanate based foams. *Journal of applied polymer science*, 93(5), 2469-2477.
34. Kapps, M., y Buschkamp, S. (2004). *The production of rigid polyurethane foam*. Bayer MaterialScience AG, Alemania. Recuperado de: http://www.materialscience.bayer.com/~media/Product%20Center/PUR/Literature/PUR%20Brochures/T_The%20production%20of%20Origid%20polyurethane%20foam.ashx (Mayo, 2015).
35. Klempner, D., y Frisch, K. C. (2007). *Handbook of polymeric foams and foam technology*. (2da Ed.). Munich, Alemania: Hanser.
36. Lamancusa, J. (2010). *Noise control*. Outdoor Sound Propagation. The Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Penn State. Recuperado: http://www.me.psu.edu/lamancusa/me458/9_trans.pdf (Mayo, 2015).
37. Lee, C. S. (2005). Polyurethane reaction injection molding: Process, materials, and properties. *Rubber Chemistry and Technology*, 53(3), 542-599.
38. Lee, C. S., Ooi, T. L., Chuah, C. H., y Ahmad, S. (2007). Rigid polyurethane foam production from palm oil-based epoxidized diethanolamides. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84(12), 1161-1167.
39. Lee, S. T., y Ramesh, N. S. (2004). *Polymeric foams: mechanisms and materials*. (2da Ed.). Nueva York, Alemania: CRC press.
40. Mahjoub, R., Bin Mohamad Yatim, J., y Mohd Sam, A. (2013). A review of structural performance of oil palm empty fruit bunch fiber in polymer composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013 (1), 1-9.

41. Mejía, M. (2012). *Elaboración de tableros aglomerados auto-adheridos a partir de fibra de raquis de palma africana*. (Proyecto de titulación previo a la obtención de título de Ingeniero Químico publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
42. Mohebbi, B., y Hajihassani, R. (2010). Moisture repellent effect of acetylation on poplar fibers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 10, 157-163.
43. Morejón, S. y Narváez L. (2005). *Materiales compuestos de matrices polietilénicas reforzadas con fibras naturales de abacá y cabuya*. (Proyecto de titulación previo a la obtención de título de Ingeniero Químico publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
44. Pickering, K. (2008). *Properties and performance of natural-fibre composites*. (1ra. Ed.). Boca Ratón, Estados Unidos: Woodhead Publishing
45. Rojo, M. (2005). *Higiene industrial aplicada" ampliada"* (2da Ed.). Buenos Aires, Argentina: Fundación Luis Fernández Velasco.
46. Rozman, H., Ahmadhilmi, K., y Abubakar, A. (2004). Polyurethane (PU)—oil palm empty fruit bunch (EFB) composites: the effect of EFBG reinforcement in mat form and isocyanate treatment on the mechanical properties. *Polymer testing*, 23(5), 559-565.
47. Rozman, H., Ahmad Hilme, K., y Abubakar, A. (2007). Polyurethane composites based on oil palm empty fruit bunches: Effect of isocyanate/hydroxyl ratio and chemical modification of empty fruit bunches with toluene diisocyanate and hexamethylene diisocyanate on mechanical properties. *Journal of applied polymer science*, 106(4), 2290-2297.

48. Silva, M., Takahashi, J., Chaussy, D., Belgacem, M., y Silva, G. (2010). Composites of rigid polyurethane foam and cellulose fiber residue. *Journal of Applied Polymer Science*, 117(6), 3665-3672.
49. Singh, H. y Jain, A. (2009). Ignition, combustion, toxicity, and fire retardancy of polyurethane foams: a comprehensive review. *Journal of Applied Polymer Science*, 111(2), 1115-1143.
50. Singh, H. (2011). *Calculation of Blowing Agents and the Flammability Characteristics of rigid Polyurethane Foam (RPUF)*. En conferencia sobre los desafíos y las aplicaciones de las técnicas de modelos matemáticos en Ciencia de la Construcción y Tecnología. (pp. 511520). Roorkee, India: Central Building Research Institute
51. Szycher, M. (2005). *Szycher's handbook of polyurethanes*. (1ra Ed.). Florida, Estados Unidos: CRC press.
52. Tamayo, N. (2012). *Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
53. Van Dam, J. E. (2008). *Natural fibres and the environment: environmental benefits of natural fibre production and use*. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0709e/i0709e03.pdf> (Mayo, 2015)
54. Vásquez, M. (2011). *Reciclaje de residuos agrícolas de café y cabuya en la elaboración de tableros compuestos en base de resinas úreaformaldehído*. (Proyecto de titulación previo a la obtención de título de Ingeniero Agropecuario publicado). Pontificia Universidad Católica de Ecuador Sede Ibarra, Ibarra, Ecuador.

55. Yang, Z., Zhao, B., Qin, S., Hu, Z., Jin, Z., y Wang, J. (2004). Study on the mechanical properties of hybrid reinforced rigid polyurethane composite foam. *Journal of applied polymer science*, 92(3), 1493-1500.
56. Zheng, D. (2015). *Industrial Engineering and Manufacturing Tecnology*. (1ra. Ed.). Londres, Inglaterra: Taylor & Francis Group.

ANEXOS

ANEXO I

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN

Se muestran los resultados completos de todos los parámetros obtenidos en los ensayos de tracción. Desde la Tabla AI. 1 hasta la Tabla AI. 13, se muestran los resultados para el material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana y con fibra de cabuya

Tabla AI. 1. Resultados del ensayo de flexión del material de poliuretano

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	17,94	3,86	0,0020	0,3632	9,41
2	17,20	3,65	0,0019	0,3528	9,67
3	12,55	2,67	0,0019	0,3157	11,82
4	15,53	3,42	0,0016	0,3056	8,94
5	10,24	3,45	0,0019	0,3361	9,74
Promedio	14,69	3,41	0,0019	0,3347	9,92
Desviación Estándar	3,24	0,45	0,00015	0,0242	1,11

Tabla AI. 2. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	19,92	4,33	0,0025	0,4244	9,80
2	16,69	3,57	0,0024	0,4327	12,12
3	13,39	2,87	0,0024	0,4532	15,79
4	18,31	3,91	0,0025	0,4272	10,93
5	23,16	5,00	0,0022	0,4155	8,31
Promedio	18,294	3,94	0,0024	0,4306	11,39
Desviación Estándar	3,64	0,81	0,00012	0,0141	2,83

Tabla AI. 3. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	20,24	4,34	0,0023	0,4544	10,47
2	20,48	4,43	0,0026	0,4497	10,15
3	21,86	4,73	0,0027	0,4532	9,58
4	18,95	4,02	0,0025	0,4571	11,37
5	20,13	4,28	0,0026	0,4655	10,88
Promedio	20,332	4,36	0,0025	0,456	10,49
Desviación Estándar	1,04	0,26	0,00015	0,006	0,68

Tabla AI. 4. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	14,02	2,94	0,0028	0,4437	15,09
2	15,18	3,19	0,0029	0,4711	14,77
3	12,87	2,71	0,0028	0,5309	19,59
4	13,07	2,78	0,0025	0,5222	18,78
5	11,65	2,47	0,0026	0,4835	19,57
Promedio	13,36	2,82	0,0027	0,4903	17,56
Desviación Estándar	1,32	0,27	0,00016	0,0362	2,43

Tabla AI. 5. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	24,93	5,30	0,0024	0,5177	9,77
2	19,82	4,21	0,0027	0,4911	11,67
3	15,27	3,28	0,0032	0,5309	16,19
4	14,16	3,05	0,003	0,5222	17,12
5	14,36	3,12	0,0031	0,5235	16,78
Promedio	17,71	3,79	0,0029	0,5171	14,30
Desviación Estándar	4,65	0,96	0,0003	0,0153	3,36

Tabla AI.6. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	10,28	2,19	0,0017	0,2892	13,21
2	16,65	3,51	0,0020	0,3565	10,16
3	16,67	3,56	0,0018	0,3134	8,80
4	15,36	3,26	0,0021	0,3254	9,98
5	16,19	3,43	0,0016	0,3506	10,22
Promedio	15,030	3,19	0,0018	0,3270	10,47
Desviación Estándar	2,708	0,57	0,0002	0,0276	1,63

Tabla AI.7. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	19,53	4,19	0,0022	0,3575	8,53
2	16,07	3,42	0,0020	0,3356	9,81
3	28,88	6,27	0,0018	0,3515	10,21
4	19,68	4,18	0,0023	0,3752	8,98
5	24,45	5,17	0,0017	0,3861	9,46
Promedio	21,72	4,65	0,0020	0,3612	9,40
Desviación Estándar	4,99	1,10	0,0003	0,0199	0,66

Tabla AI. 8. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	20,52	4,47	0,0021	0,3978	13,89
2	15,16	3,25	0,0024	0,4303	13,24
3	18,17	3,92	0,0025	0,4395	14,21
4	11,23	2,42	0,0020	0,4058	16,77
5	18,54	3,99	0,0022	0,3418	12,56
Promedio	16,72	3,61	0,0022	0,4030	14,13
Desviación Estándar	3,62	0,79	0,0002	0,0383	1,60

Tabla AI. 9. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	19,21	4,07	0,0026	0,4248	10,44
2	13,42	2,84	0,0024	0,4516	15,90
3	16,73	3,62	0,0027	0,4880	13,48
4	14,88	3,14	0,0023	0,4545	14,47
5	19,75	4,23	0,0026	0,4479	10,59
Promedio	16,80	3,58	0,0025	0,4534	12,98
Desviación Estándar	2,72	0,59	0,0002	0,0226	2,41

Tabla AI. 10. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	9,04	1,93	0,0026	0,4486	23,24
2	11,57	2,50	0,0027	0,4692	18,77
3	14,68	3,15	0,0023	0,4511	17,32
4	18,88	4,11	0,0028	0,4545	15,09
5	15,25	3,27	0,0024	0,4797	14,67
Promedio	13,88	2,99	0,0026	0,4606	17,82
Desviación Estándar	3,75	0,82	0,0002	0,0133	3,46

Tabla AI. 11. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	17,27	3,68	0,0025	0,5496	14,93
2	19,90	4,27	0,0028	0,5228	12,24
3	14,85	3,21	0,0031	0,5283	16,46
4	16,67	3,56	0,0032	0,4987	14,01
5	14,30	3,07	0,0030	0,5215	16,99
Promedio	16,60	3,56	0,0029	0,5242	14,93
Desviación Estándar	2,22	0,47	0,0003	0,0182	1,91

Tabla AI. 12. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	20,24	4,31	0,0016	0,3155	7,90
2	26,31	5,56	0,0018	0,3448	9,20
3	18,33	3,87	0,0021	0,3295	8,51
4	17,33	3,69	0,0019	0,3534	9,58
5	13,17	2,79	0,0016	0,2759	9,89
Promedio	19,08	4,04	0,0018	0,3238	9,02
Desviación Estándar	4,80	1,01	0,0002	0,0305	0,81

Tabla AI. 13. Resultados del ensayo de flexión del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento en el punto de fluencia (mm)	Deformación en el punto de fluencia (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	25,37	5,39	0,0024	0,3952	7,33
2	19,10	4,11	0,0021	0,4058	9,87
3	25,01	5,35	0,0023	0,3745	8,11
4	29,26	6,23	0,0019	0,4182	8,71
5	15,51	3,29	0,0022	0,3724	11,32
Promedio	22,85	4,87	0,0022	0,3932	9,07
Desviación Estándar	5,48	1,16	0,0002	0,0198	1,56

ANEXO II

ANÁLISIS DE GRÁFICOS DE MEDIANAS – STATGRAPHICS

Se realizó un análisis de los gráficos de las medianas obtenidas utilizando el software de Statgraphis. El programa nos indica que si las líneas se traslapan, quiere decir que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias, con un nivel de confianza del 95%.

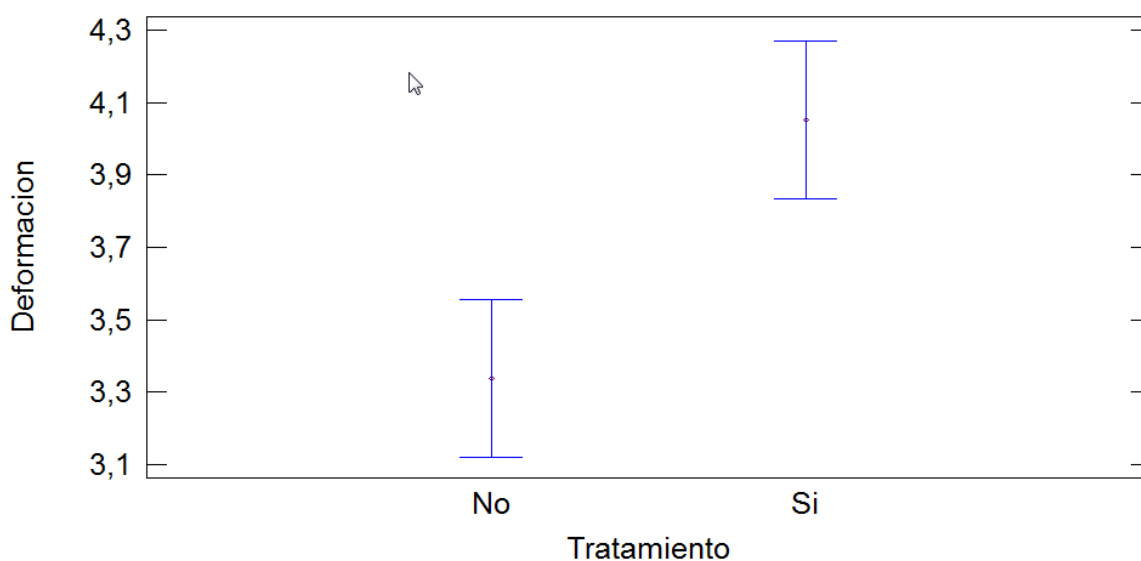


Figura AII.1. Gráfico de medianas para el material con raquis de palma africana en el parámetro de deformación del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico

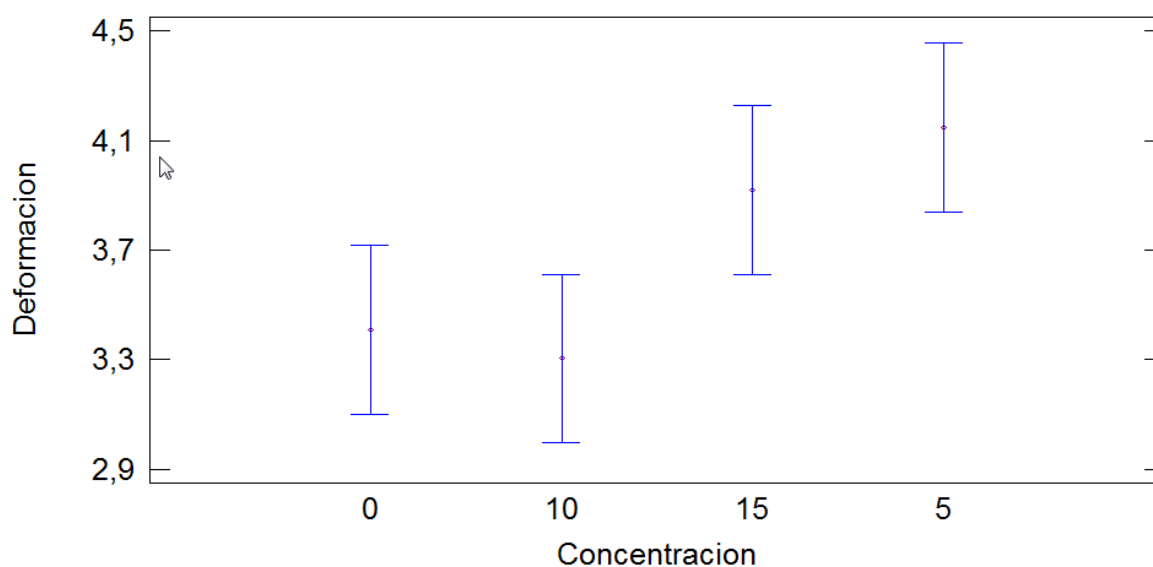


Figura AII.2. Gráfico de medianas para el material con raquis de palma africana en el parámetro de deformación el ensayo de flexión cuya variable es la concentración

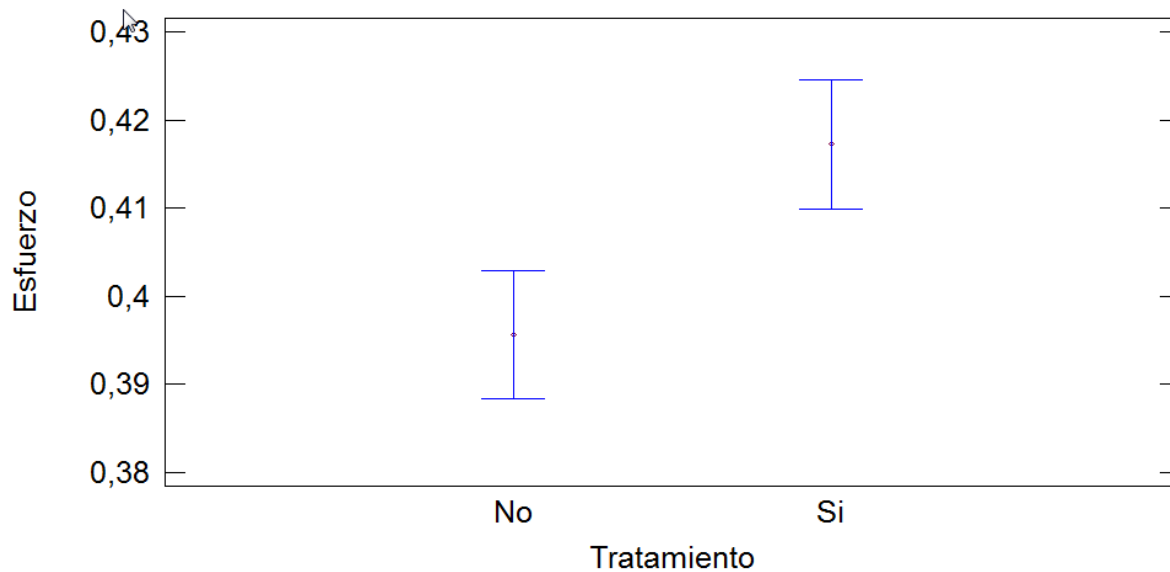


Figura AII.3. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico

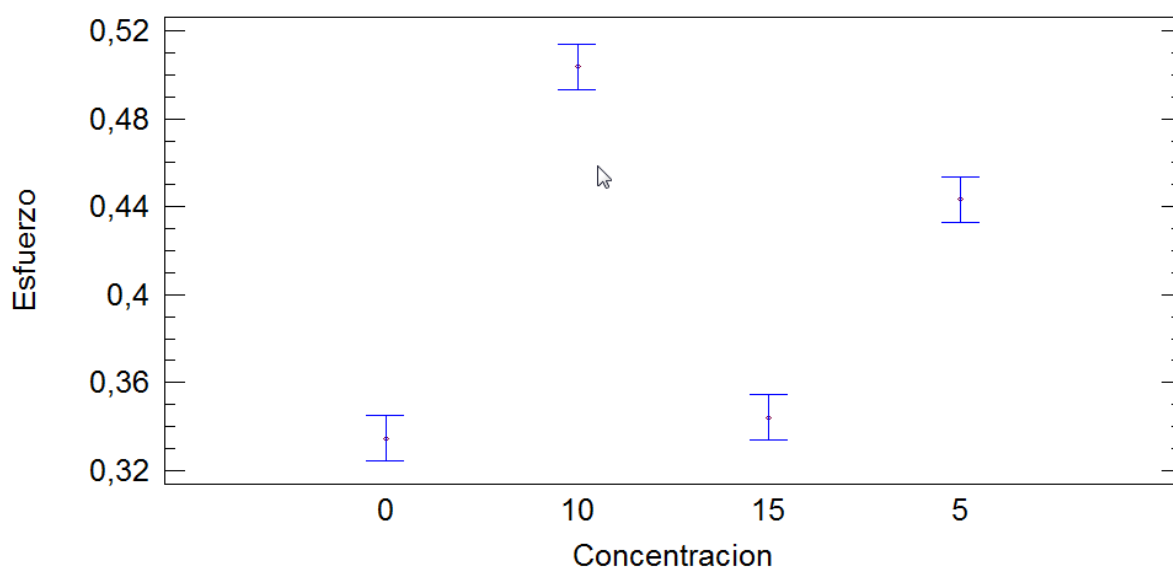


Figura AII.4. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra

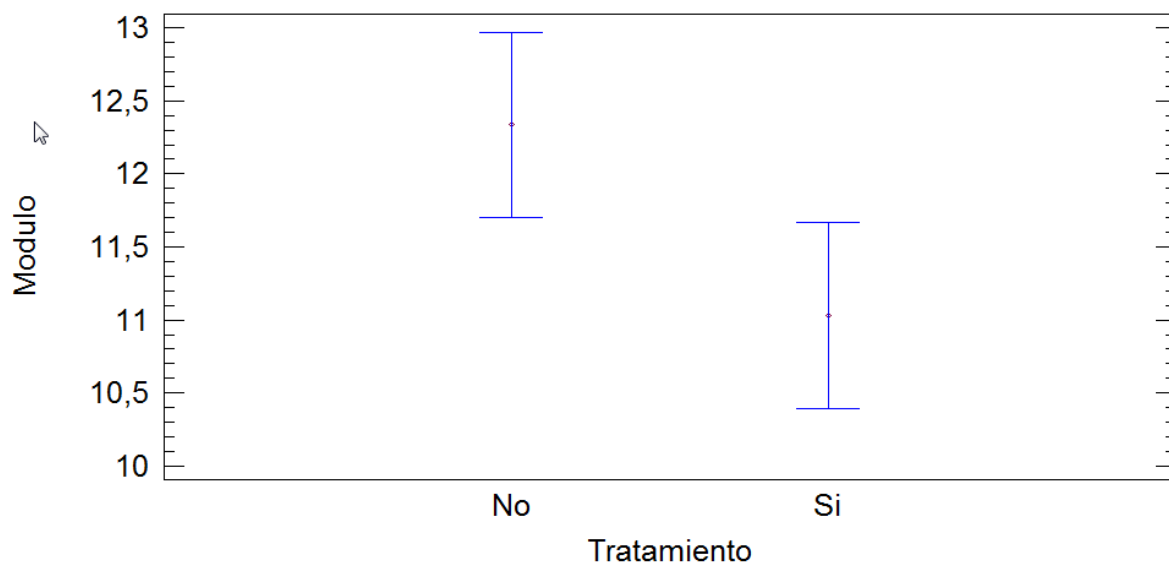


Figura AII.5. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico

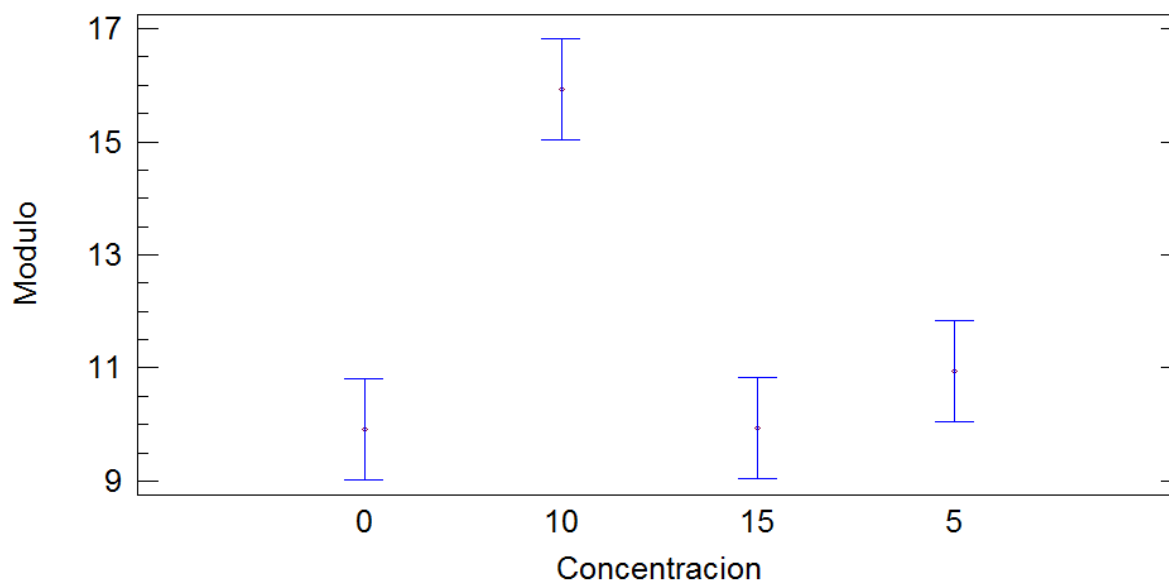


Figura AII.6. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo en el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra

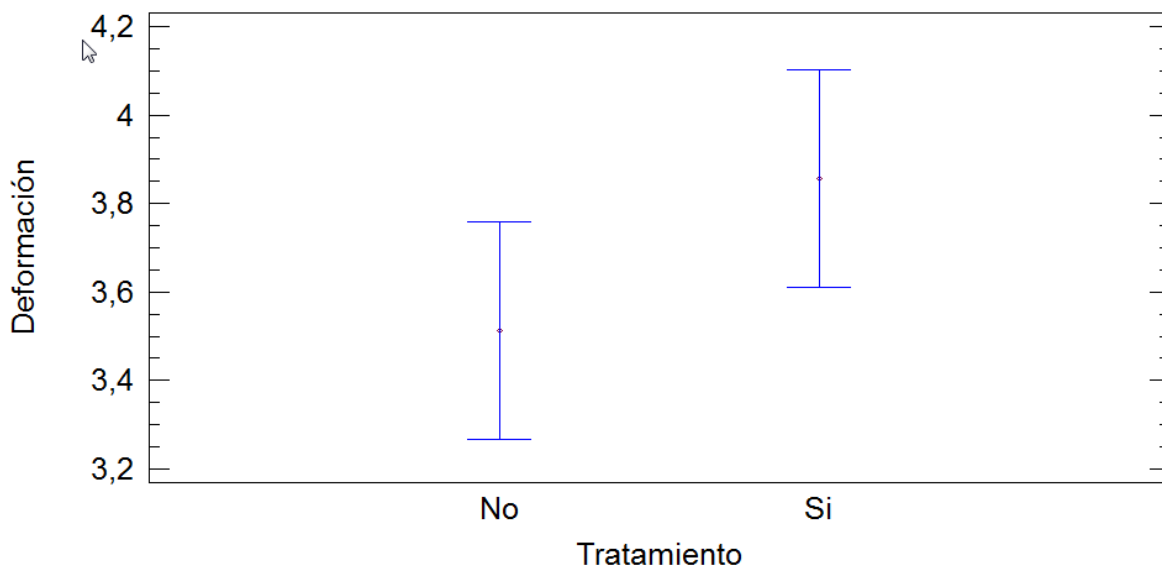


Figura AII.7. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico

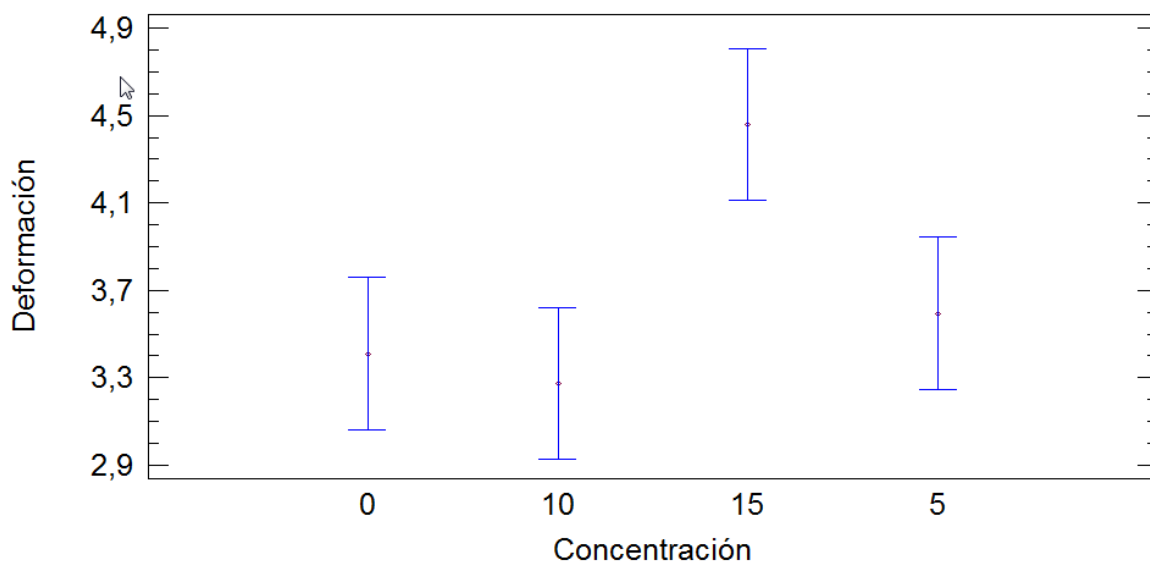


Figura AII.8. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra

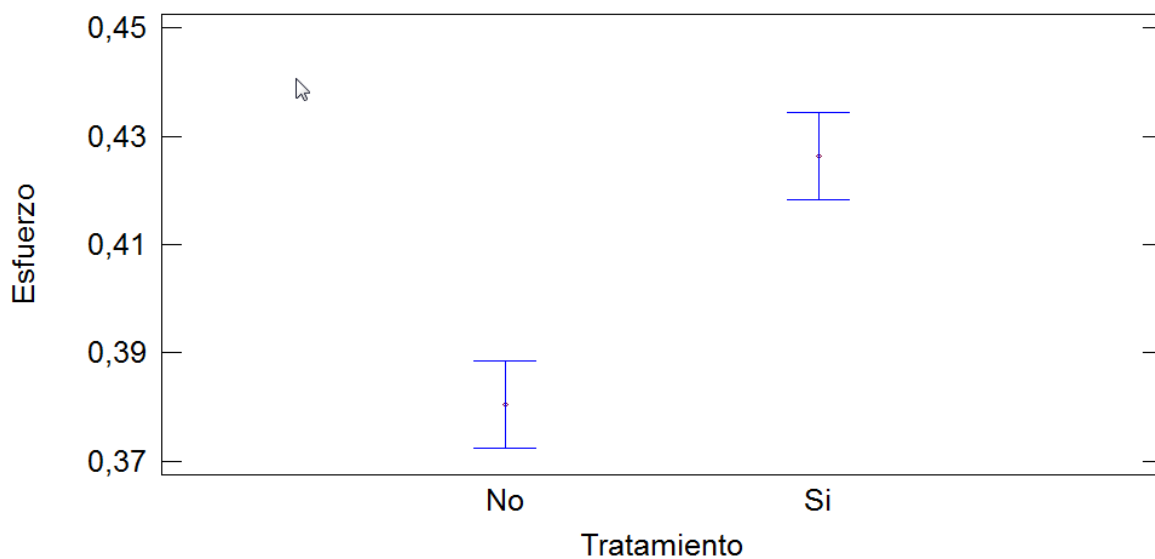


Figura AII.9. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico

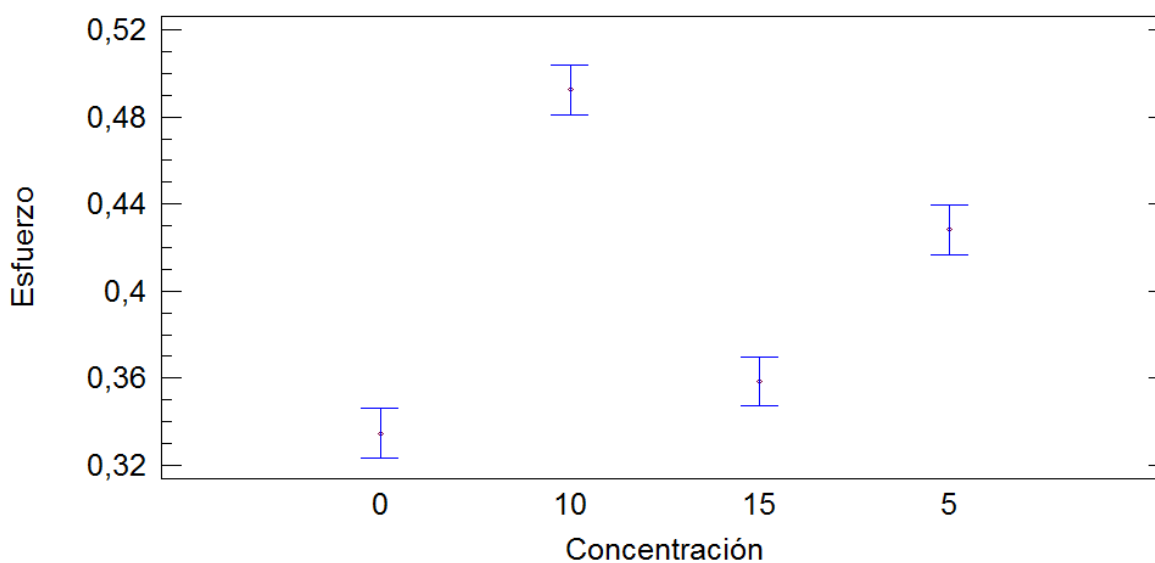


Figura AII.10. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra

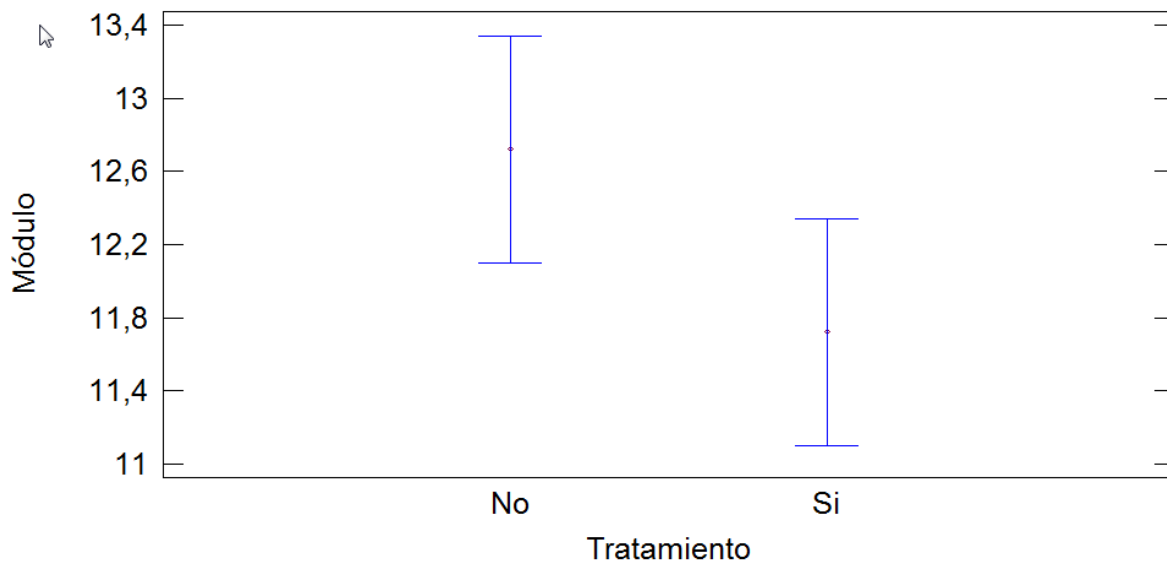


Figura AII.11. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo del ensayo de flexión cuya variable es el tratamiento químico

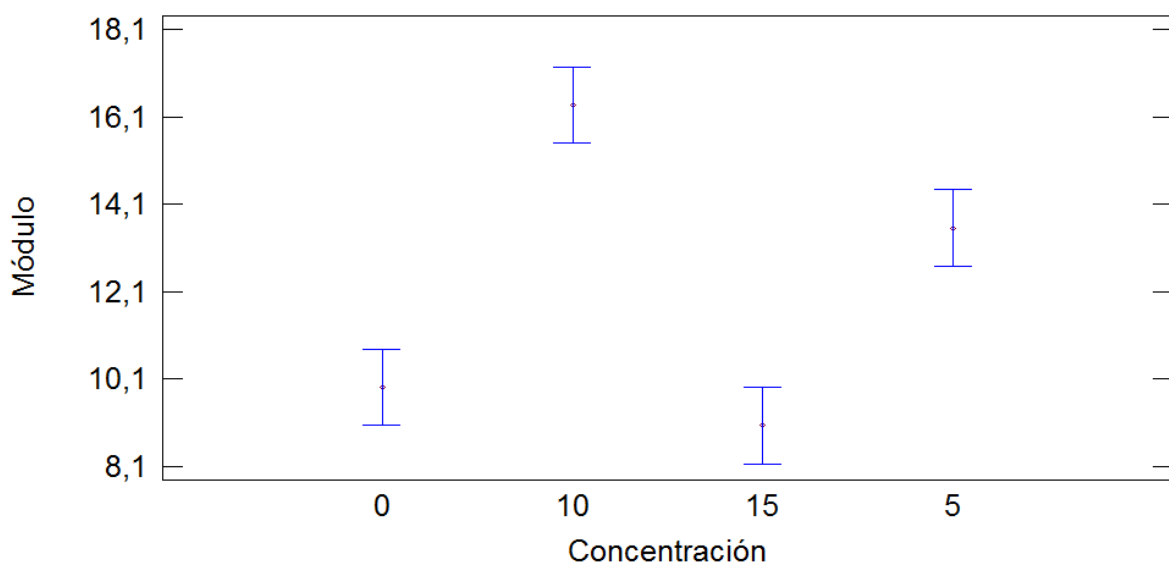


Figura AII.12. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo en el ensayo de flexión cuya variable es la concentración de la fibra

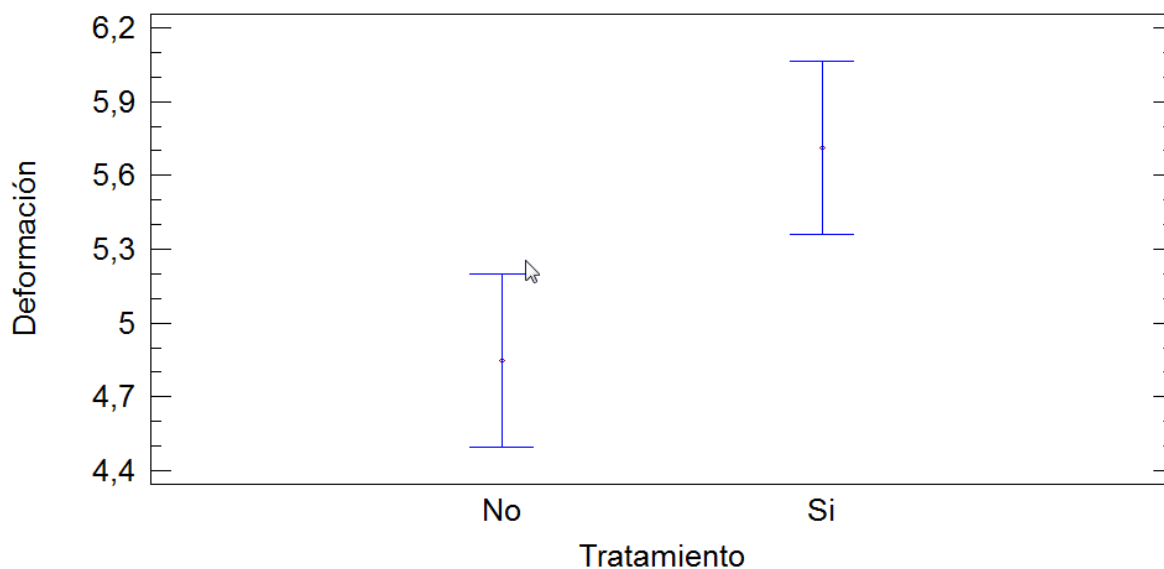


Figura AII.13. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de deformación del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico

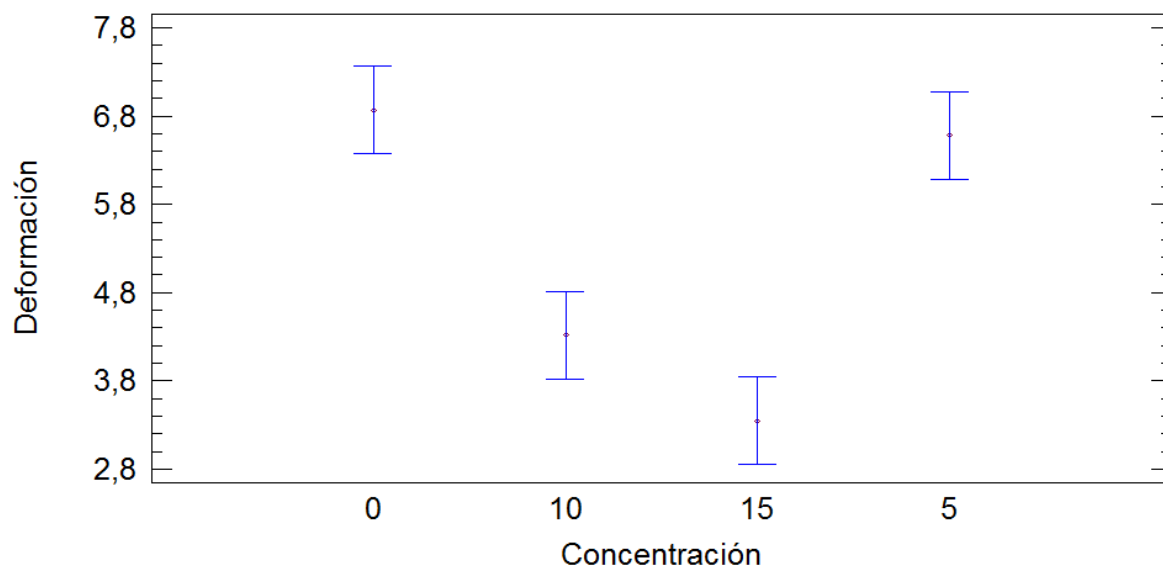


Figura AII.14. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de deformación el ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra

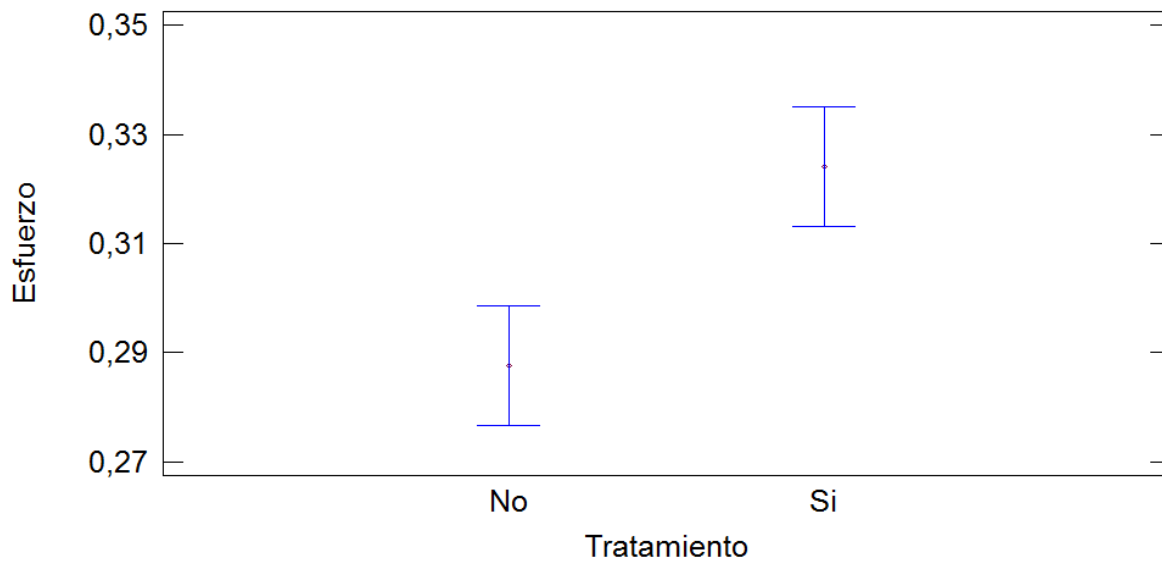


Figura AII.15. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico

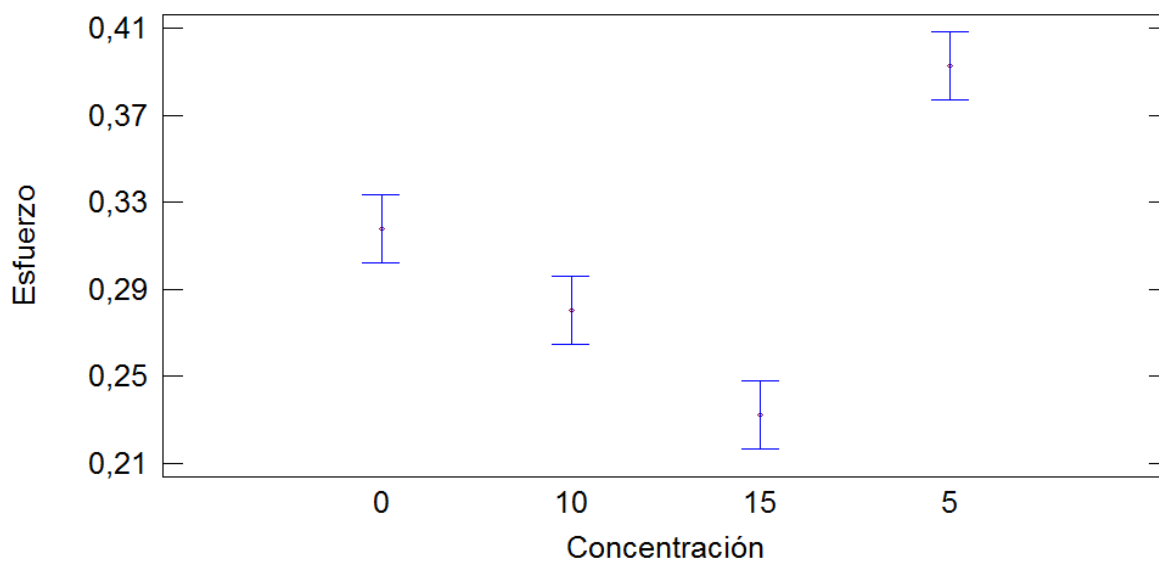


Figura AII.16. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra

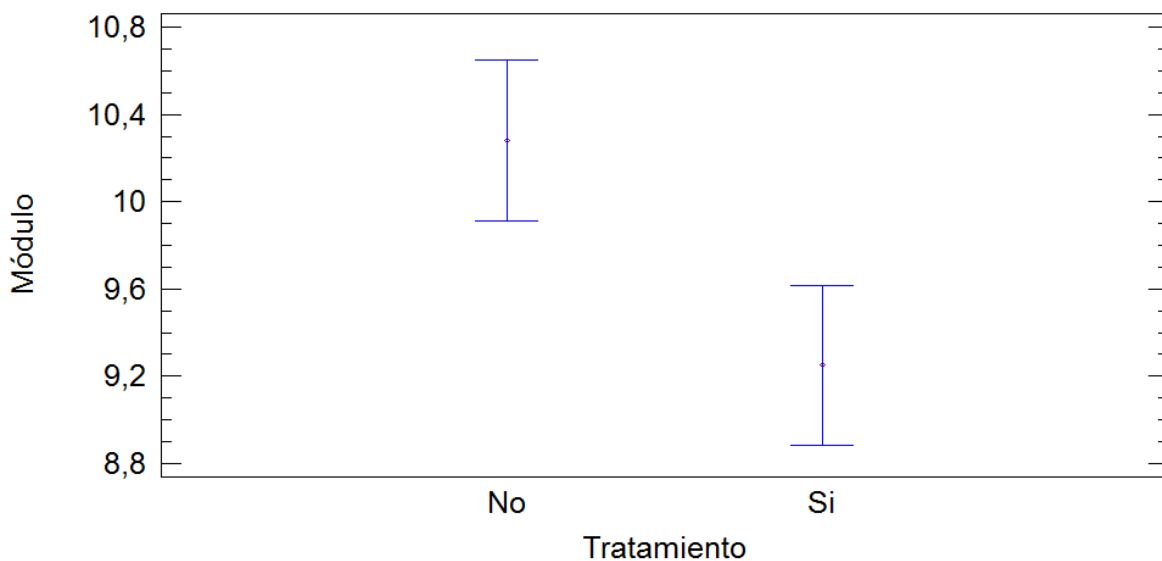


Figura AII.17. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo del ensayo de f tracción cuya variable es el tratamiento químico

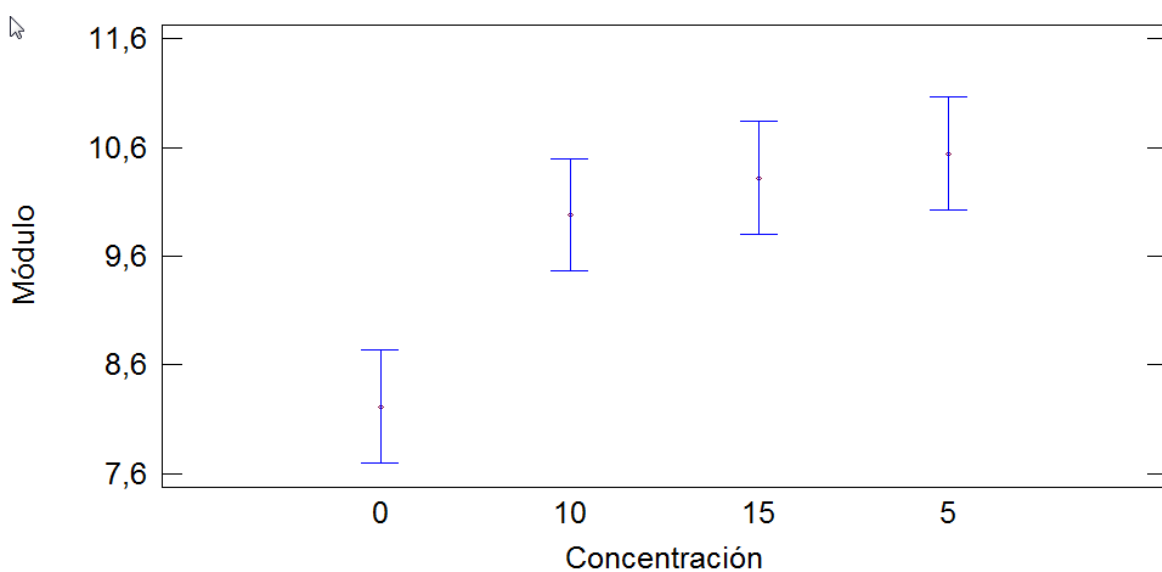


Figura AII.18. Gráfico de medianas para el material compuesto con raquis de palma africana en el parámetro de módulo en el ensayo de f tracción cuya variable es la concentración de la fibra

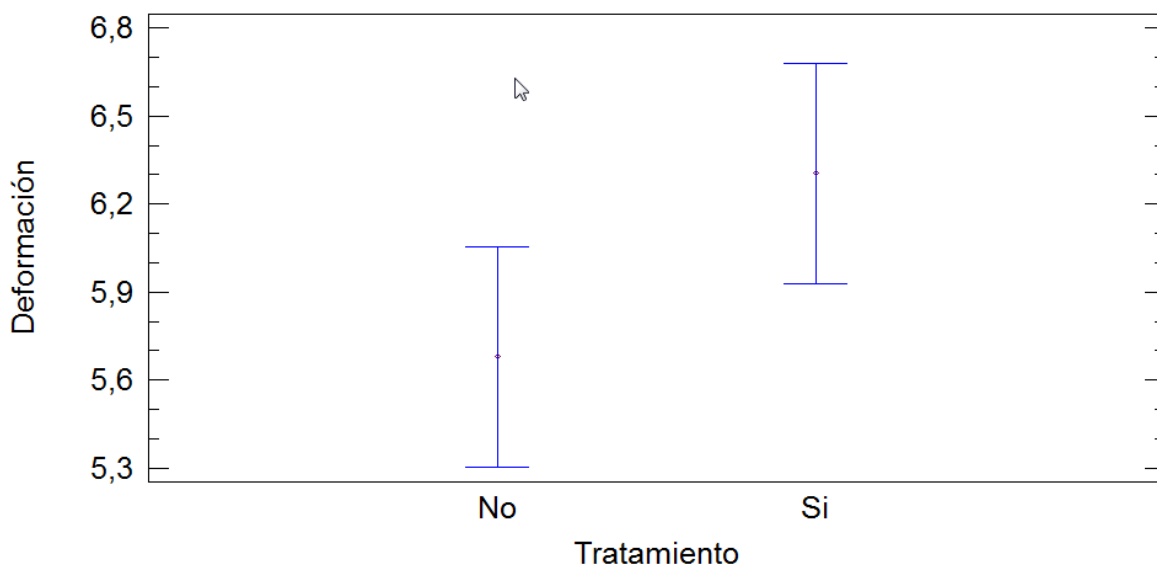


Figura AII.19. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico

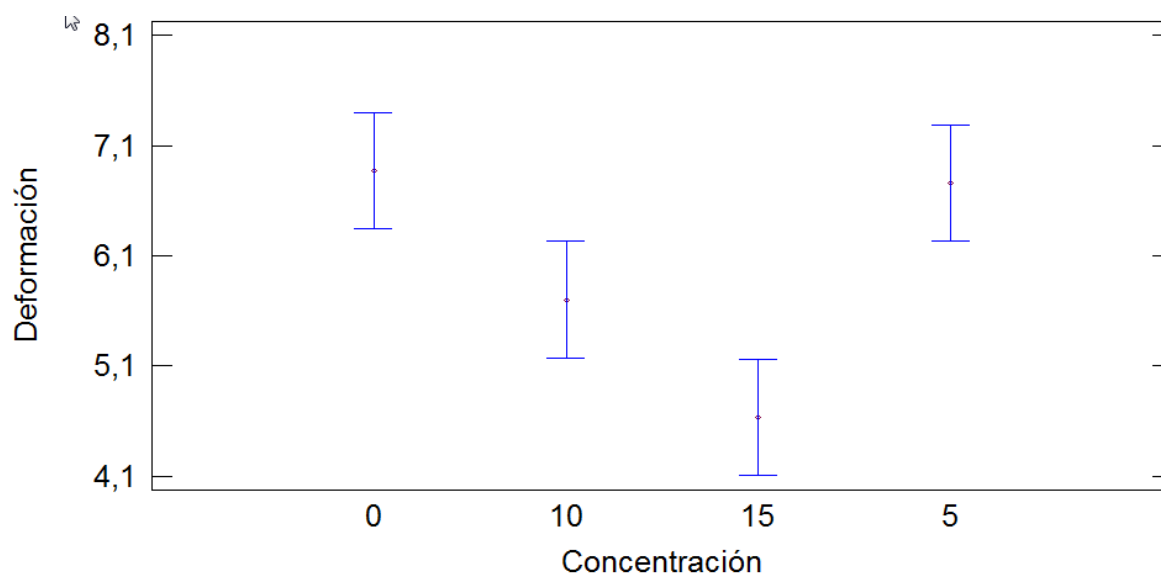


Figura AII.20. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de deformación el ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra

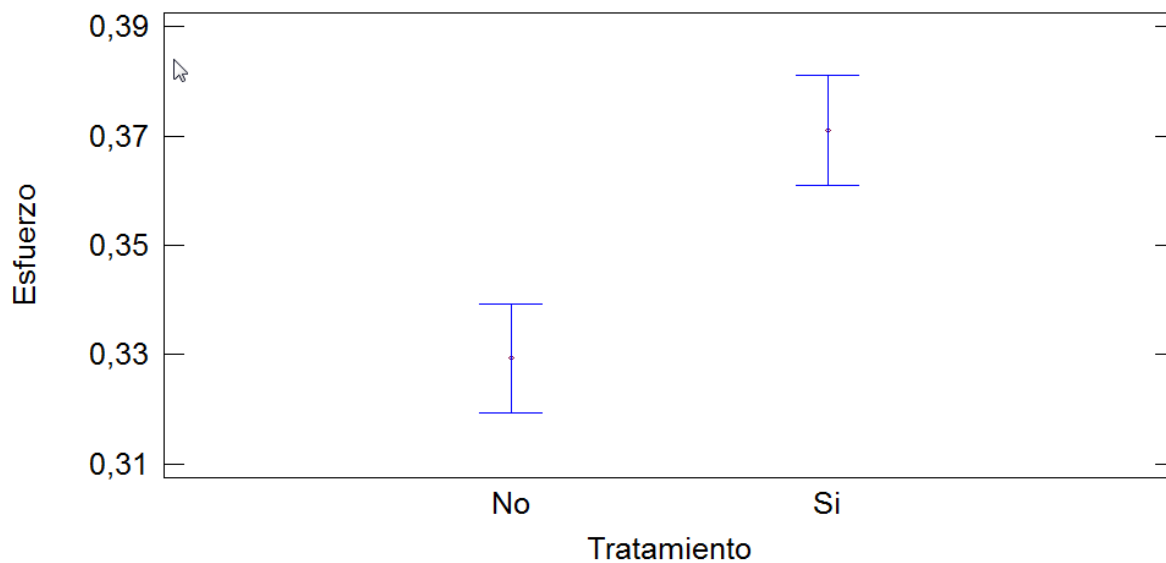


Figura AII.21. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico

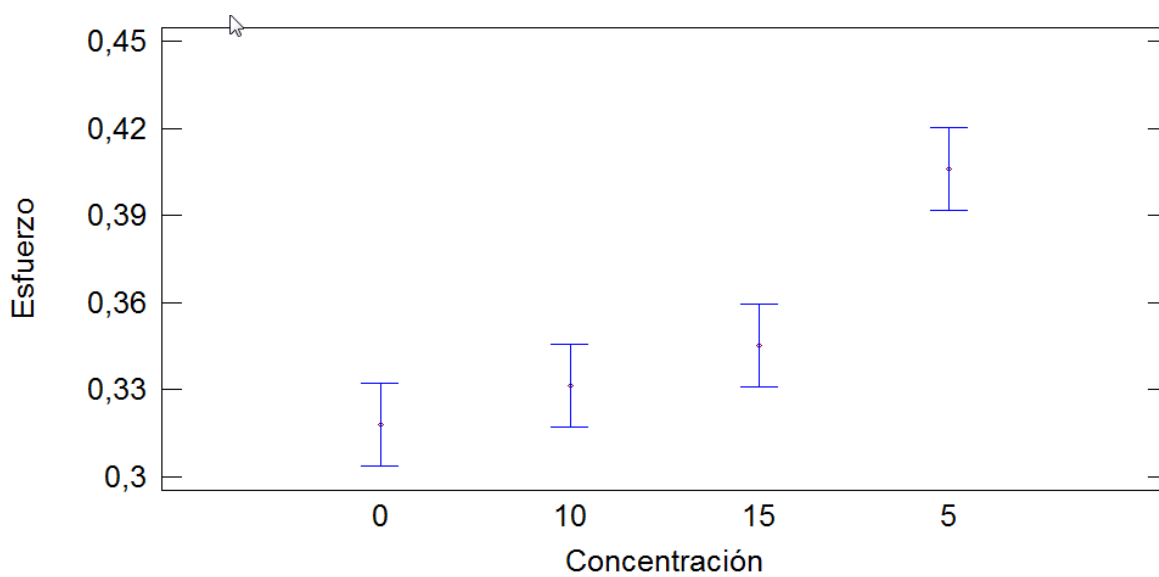


Figura AII.22. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de esfuerzo máximo del ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra

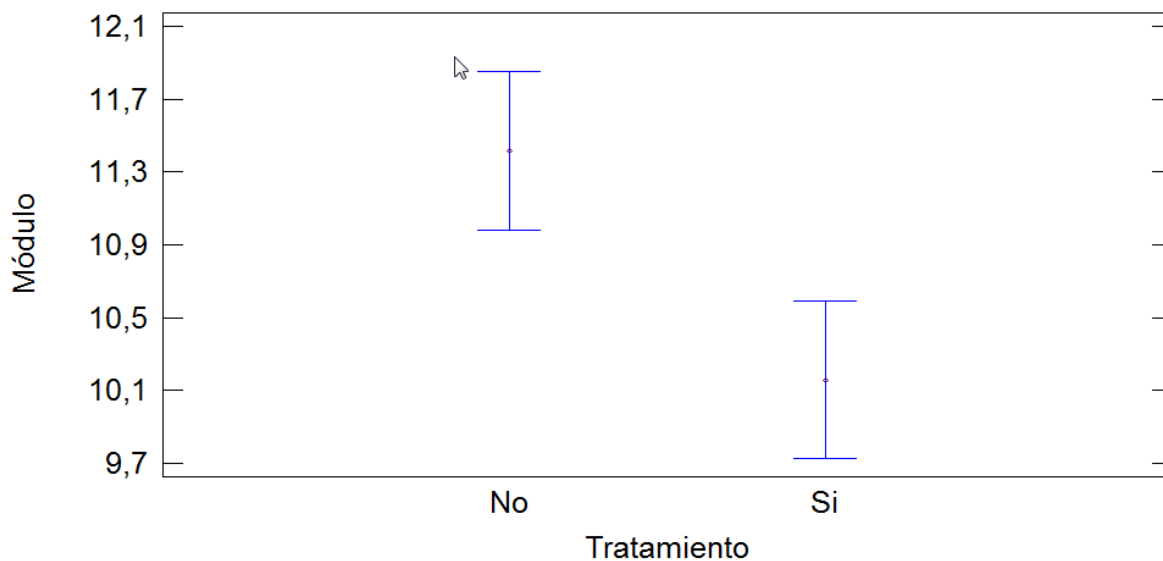


Figura AII.23. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo del ensayo de tracción cuya variable es el tratamiento químico

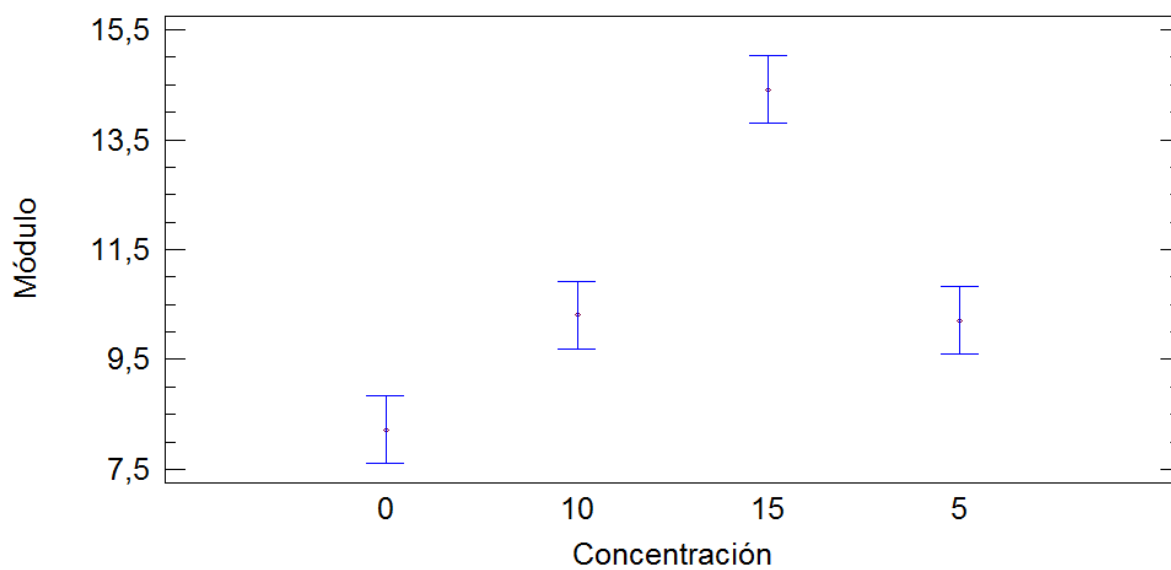


Figura AII.24. Gráfico de medianas para el material compuesto con cabuya en el parámetro de módulo en el ensayo de tracción cuya variable es la concentración de la fibra

ANEXO III

ANÁLISIS ANOVA – STATGRAPHICS

En las Tabla AIII. 1 y Tabla AIII. 2 se muestran los resultados del análisis ANOVA, el cual fue realizado con el software Statgraphics. Se diseñó un modelo estadístico para evaluar las influencias de las variables sobre los parámetros de los ensayos mecánicos. Las variables fueron: concentración en peso de fibra, tipo de fibra y tratamiento químico a la fibra. Los parámetros fueron: desplazamiento, deformación, carga máxima, esfuerzo máximo y módulo.

En las tablas se muestra el valor-P, si el valor-P es menor a 0,05 quiere decir que la variable tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el parámetro con un 95% de nivel de confianza.

Tabla AIII. 1. Valor-P para los parámetros del ensayo de flexión del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra natural

Parámetro Variable	Valor-P				
	Desplazamiento en el punto de fluencia	Deformación en el punto de fluencia	Carga máxima	Esfuerzo máximo	Módulo Young
Concentración en peso de fibra	0,0018	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000
Tipo de fibra	0,9271	0,9445	0,6256	0,5104	0,1944
Tratamiento químico	0,0009	0,0009	0,0000	0,0893	0,0000

Tabla AIII. 2. Valor-P para los parámetros del ensayo de tracción del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra natural

Parámetro Variable	Valor-P				
	Desplazamiento al pico	Deformación al pico	Carga máxima	Esfuerzo máximo	Módulo Young
Concentración en peso de fibra	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Tipo de fibra	0,0001	0,0003	0,0000	0,0000	0,0004
Tratamiento químico	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001

ANEXO IV

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Se muestran los resultados completos de todos los parámetros obtenidos en los ensayos de tracción. Desde la Tabla AIII. 1 hasta la Tabla AIII. 13, se muestran los resultados para el material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibra de raquis de palma africana y con fibra de cabuya

Tabla AIV. 1. Resultados del ensayo de tracción del material de poliuretano

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	3,22	5,36	0,0380	0,2815	9,46
2	3,90	6,50	0,0406	0,3224	8,29
3	5,30	8,83	0,0428	0,3515	7,32
4	4,90	8,17	0,0454	0,3771	8,16
5	3,30	5,50	0,0333	0,2573	7,84
Promedio	4,12	6,87	0,0400	0,3180	8,21
Desviación Estándar	0,94	1,57	0,0046	0,0491	0,79

Tabla AIV. 2. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2,90	4,83	0,0367	0,3498	12,83
2	3,70	6,17	0,0533	0,3699	11,88
3	3,60	6,00	0,0504	0,3597	10,24
4	3,20	5,33	0,0424	0,3247	11,52
5	3,60	6,00	0,0363	0,3368	13,01
Promedio	3,40	5,67	0,0438	0,3482	11,90
Desviación Estándar	0,34	0,57	0,0078	0,0179	1,12

Tabla AIV. 3. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	4,60	7,67	0,0588	0,4600	8,83
2	5,00	8,33	0,0559	0,4580	9,07
3	5,10	8,50	0,0549	0,4294	9,29
4	3,90	6,50	0,0536	0,4215	10,44
5	3,90	6,50	0,0522	0,4191	8,33
Promedio	4,50	7,50	0,0551	0,4376	9,19
Desviación Estándar	0,58	0,96	0,0025	0,0199	0,78

Tabla AIV. 4. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2,70	4,50	0,0338	0,2643	11,46
2	2,30	3,83	0,0294	0,2301	8,83
3	2,50	4,17	0,0341	0,2557	12,13
4	2,90	4,83	0,0353	0,2579	10,24
5	2,10	3,50	0,0305	0,2878	9,50
Promedio	2,50	4,17	0,0326	0,2592	10,43
Desviación Estándar	0,32	0,53	0,0025	0,0206	1,36

Tabla AIV. 5. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2,60	4,33	0,0344	0,2828	9,36
2	2,70	4,50	0,0367	0,2673	8,97
3	2,52	4,19	0,0459	0,3551	8,76
4	2,60	4,33	0,0359	0,3006	9,74
5	3,00	5,00	0,0369	0,3018	10,81
Promedio	2,68	4,47	0,0380	0,3015	9,53
Desviación Estándar	0,19	0,32	0,0045	0,0331	0,81

Tabla AIV.6. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	1,58	2,85	0,0252	0,2169	11,86
2	1,57	3,90	0,0363	0,2812	9,98
3	1,60	0,17	0,0281	0,2237	10,74
4	1,89	3,17	0,0281	0,2145	10,78
5	1,41	3,33	0,0241	0,1903	9,52
Promedio	1,61	2,68	0,0284	0,2253	10,58
Desviación Estándar	0,17	1,46	0,0048	0,0337	0,89

Tabla AIV.7. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2,90	4,83	0,0283	0,2357	9,76
2	2,94	4,90	0,0387	0,2938	10,32
3	1,70	2,83	0,0263	0,2141	13,33
4	2,60	4,33	0,0281	0,2097	8,50
5	1,90	3,17	0,0293	0,2436	8,42
Promedio	2,41	4,01	0,0301	0,2394	10,07
Desviación Estándar	0,57	0,96	0,0049	0,0336	2,00

Tabla AIV. 8. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	4,40	7,33	0,0505	0,3662	12,78
2	4,03	6,72	0,0545	0,3832	10,61
3	3,74	6,23	0,0547	0,3794	10,03
4	2,60	4,33	0,0373	0,3979	12,08
5	3,80	6,33	0,0411	0,365	10,04
Promedio	3,71	6,19	0,0476	0,3783	11,11
Desviación Estándar	0,67	1,12	0,0080	0,0135	1,25

Tabla AIV. 9. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 5% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	4,70	7,83	0,0581	0,4584	8,45
2	5,10	8,50	0,0557	0,4653	9,83
3	3,60	6,00	0,0528	0,4118	10,26
4	4,19	6,99	0,0543	0,4189	9,61
5	4,40	7,33	0,0519	0,4133	8,44
Promedio	4,40	7,33	0,0546	0,4335	9,32
Desviación Estándar	0,56	0,94	0,0025	0,0261	0,83

Tabla AIV. 10. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	4,40	7,33	0,0413	0,3204	9,89
2	2,32	3,87	0,0437	0,3057	12,03
3	2,60	4,33	0,0284	0,2798	9,64
4	2,60	4,33	0,0341	0,2749	10,85
5	4,00	6,67	0,0413	0,3191	10,42
Promedio	3,18	5,31	0,0378	0,3000	10,56
Desviación Estándar	0,95	1,58	0,0064	0,0215	0,94

Tabla AIV. 11. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 10% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	4,10	6,83	0,0438	0,3689	9,55
2	4,10	6,83	0,0512	0,3896	12,96
3	3,00	5,00	0,0418	0,3713	8,08
4	3,70	6,17	0,0453	0,3448	10,66
5	3,40	5,67	0,0463	0,3401	9,00
Promedio	3,66	6,10	0,0457	0,3629	10,05
Desviación Estándar	0,47	0,79	0,0035	0,0204	1,88

Tabla AIV. 12. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2,54	4,24	0,0404	0,3315	13,65
2	2,62	4,37	0,0416	0,3181	17,63
3	2,50	4,17	0,0430	0,3384	16,43
4	2,50	4,17	0,0366	0,2935	13,14
5	2,90	4,83	0,0405	0,3241	18,02
Promedio	2,61	4,36	0,0404	0,3211	15,77
Desviación Estándar	0,17	0,28	0,0024	0,0172	2,26

Tabla AIV. 13. Resultados del ensayo de tracción del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso

Probeta N°	Desplazamiento al pico (mm)	Deformación al pico (%)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	3,07	5,12	0,0444	0,3361	14,61
2	3,60	6,00	0,0496	0,3899	12,21
3	3,07	5,12	0,0555	0,4042	13,78
4	2,40	4,01	0,0353	0,3736	11,47
5	2,60	4,33	0,0477	0,3434	13,17
Promedio	2,95	4,91	0,0465	0,3694	13,05
Desviación Estándar	0,47	0,78	0,0074	0,0293	1,24

ANEXO V

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD

En la Tabla AV. 1 se muestran las tres repeticiones que se realizaron para tomar las medidas del ancho, largo y alto del molde, el cual fue utilizado para la elaboración del material compuesto.

Tabla AV. 1. Medidas de las dimensiones del molde utilizado para la elaboración del material compuesto de matriz de poliuretano rígido con fibras naturales

	Ancho (cm)	Largo (cm)	Alto (mm)
1	14,98	20,3	12,8
2	15	20,4	13
3	14,98	20,4	13
Promedio	14,987	20,367	12,933

El cálculo del volumen del molde se lo realizó con base en el valor promedio de sus dimensiones:

$$Volumen = ancho * largo * alto$$

$$Volumen = 14,987 * 20,367 * 12,933 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$Volumen = 394,76 \text{ (cm}^3\text{)}$$

Desde la Tabla AV. 2 hasta la Tabla AV. 6 se muestran los resultados del peso que se obtuvieron para cada uno de los materiales compuestos desarrollados y para el material puro. Para cada material se obtuvo el peso de tres muestras y para obtener el peso de cada muestra se realizaron tres repeticiones.

Tabla AV. 2. Resultados del peso del material de poliuretano

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso 1 (g)	17,1068	16,9818	16,8003
Peso 2 (g)	17,1072	16,9837	16,7981
Peso 3 (g)	17,1063	16,9853	16,7998
Promedio	17,107	16,984	16,799
Densidad	43,334	43,022	42,556

Tabla AV. 3. Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso 1 (g)	24,1793	25,0401	24,7165
Peso 2 (g)	24,1785	25,0302	24,7174
Peso 3 (g)	24,1758	25,50294	24,7166
Promedio	24,178	25,191	24,717
Densidad	61,247	63,813	62,612

Tabla AV. 4. Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso 1 (g)	24,7139	25,4722	24,5526
Peso 2 (g)	24,7153	25,4699	24,5533
Peso 3 (g)	24,7139	25,4686	24,5522
Promedio	24,714	25,470	24,553
Densidad	62,606	64,520	62,196

Tabla AV. 5. Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso 1 (g)	26,1972	26,6618	26,5444
Peso 2 (g)	26,1987	26,6613	26,5441
Peso 3 (g)	26,1981	26,6591	26,5455
Promedio	26,198	26,661	26,545
Densidad	66,364	67,536	67,242

Tabla AV. 6. Resultados del peso del material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratada al 15% en peso

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso 1 (g)	26,2813	26,6811	26,9707
Peso 2 (g)	26,2764	26,6886	26,9689
Peso 3 (g)	26,2766	26,6875	26,9696
Promedio	26,278	26,686	26,970
Densidad	66,567	67,600	68,319

Para el cálculo de las densidades de cada muestra, se utilizó la fórmula de la densidad. A la fórmula se le debió multiplicar por un factor de 1 000 para que las unidades de este parámetro se obtengan en (kg/m^3). A continuación se realiza un ejemplo de cálculo de densidad para la primera muestra del material de poliuretano:

$$\delta = \frac{m}{V}$$

$$\delta = \frac{17,1068}{394,76} \times 100 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\delta = 43,334 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

ANEXO VI

RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLAMABILIDAD

Desde la Tabla AVI.1 hasta la Tabla AVI.5 se muestran el tiempo de duración de la llama y la longitud de quemado que se obtuvo en el ensayo de flamabilidad para los materiales compuestos desarrollados y para el material puro. En las tablas se observa que no todos los materiales presentan tiempo de llama y longitud de quemado, esto se debe a que al momento de exponer la probeta a la llama, la llama no se propagaba a través de la probeta. Además en las tablas se detallan el color del humo y de la llama, y si la llama alcanzó las marcas que son explicadas en el punto 2.3.2.2. En el desarrollo de este ensayo para cada material se realizó un total de diez repeticiones.

Para el cálculo de la velocidad lineal de combustión se utilizó la fórmula [1.4] explicada en el punto 1.4.2. A continuación se realiza el ejemplo de cálculo para la sexta probeta del material de poliuretano:

$$V = \frac{60 L}{t} \left[\frac{mm}{min} \right]$$

$$V = \frac{60 * 4}{3,26} \left[\frac{mm}{min} \right]$$

$$V = 73,62 \left[\frac{mm}{min} \right]$$

Tabla AVI. 1. Resultados del ensayo de flamabilidad para material de poliuretano

	Humo	Llama	Tiempo (s)	Longitud quemado (mm)	Velocidad combustión (mm/min)	Alcanzó la marca de 25 mm	Alcanzó la marca de 100 mm
1	negro	anaranjado				No	No
2	negro	anaranjado				No	No
3	negro	anaranjado				No	No
4	negro	anaranjado				No	No
5	negro	anaranjado				No	No
6	negro	anaranjado	3,26	4	73,62	Sí	No
7	negro	anaranjado	5,08	6	70,87	Sí	No
8	negro	anaranjado				No	No
9	negro	anaranjado				No	No
10	negro	anaranjado				No	No
		Promedio	4,17	5	72,24		

Tabla AVI. 2. Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso

	Humo	Llama	Tiempo (s)	Longitud quemado (mm)	Velocidad combustión (mm/min)	Alcanzó la marca de 25 mm	Alcanzó la marca de 100 mm
1	negro	amarilla				No	No
2	negro	amarilla	6,29	13	124,01	Sí	No
3	negro	amarilla	7,49	7	56,07	Sí	No
4	negro	amarilla				No	No
5	negro	amarilla	7,46	5	40,21	Sí	No
6	negro	amarilla	5,88	6	61,22	Sí	No
7	negro	amarilla				No	No
8	negro	amarilla	7,99	15	112,64	Sí	No
9	negro	amarilla				No	No
10	negro	amarilla	8,02	23	172,07	Sí	No
		Promedio	7,19	11,5	94,37		

Tabla AVI. 3. Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratada al 15% en peso

	Humo	Llama	Tiempo (s)	Longitud quemado (mm)	Velocidad combustión (mm/min)	Alcanzó la marca de 25 mm	Alcanzó la marca de 100 mm
1	negro	amarilla	2,51	6	143,43	Sí	No
2	negro	amarilla	5,41	14	155,27	Sí	No
3	negro	amarilla	5,36	12	134,33	Sí	No
4	negro	amarilla	4,83	10	124,22	Sí	No
5	negro	amarilla	4,96	9	108,87	Sí	No
6	negro	amarilla	2,81	7	149,47	Sí	No
7	negro	amarilla	2,16	6	166,67	Sí	No
8	negro	amarilla	3,69	9	146,34	Sí	No
9	negro	amarilla	3,86	9	139,90	Sí	No
10	negro	amarilla	2,35	7	178,72	Sí	No
		Promedio	3,79	8,9	144,72		

Tabla AVI. 4. Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso

	Humo	Llama	Tiempo (s)	Longitud quemado (mm)	Velocidad combustión (mm/min)	Alcanzó la marca de 25 mm	Alcanzó la marca de 100 mm
1	negro	anaranjado				No	No
2	negro	anaranjado	6,53	10	91,88	Sí	No
3	negro	anaranjado	4,16	5	72,12	Sí	No
4	negro	anaranjado	6,56	12	109,76	Sí	No
5	negro	anaranjado	5,95	7	70,59	Sí	No
6	negro	anaranjado				No	No
7	negro	anaranjado				No	No
8	negro	anaranjado				No	No
9	negro	anaranjado	4,74	7	88,61	Sí	No
10	negro	anaranjado	4,95	5	60,61	Sí	No
		Promedio	5,48	7,67	82,26		

Tabla AVI. 5. Resultados del ensayo de flamabilidad para material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratada al 15% en peso

	Humo	Llama	Tiempo (s)	Longitud quemado (mm)	Velocidad combustión (mm/min)	Alcanzó la marca de 25 mm	Alcanzó la marca de 100 mm
1	negro	anaranjado				No	No
2	negro	anaranjado	13,27	27	122,08	Sí	No
3	negro	anaranjado	8,63	14	97,33	Sí	No
4	negro	anaranjado	12,84	23	107,48	Sí	No
5	negro	anaranjado	12,79	30	140,73	Sí	No
6	negro	anaranjado	5,35	9	100,93	Sí	No
7	negro	anaranjado	3,22	6	111,80	Sí	No
8	negro	anaranjado	1,43	3	125,87	Sí	No
9	negro	anaranjado	8,09	15	111,25	Sí	No
10	negro	anaranjado	6,47	11	102,01	Sí	No
		Promedio	8,01	15,33	113,28		

ANEXO VII

ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Desde la Tabla AVII. 1 hasta la Tabla AVII. 15 se muestran las temperaturas que se obtuvieron en el ensayo de conductividad térmica para los materiales compuestos desarrollados. En las tablas se detallan cuatro temperaturas que corresponden a la temperatura de cada placa del equipo, como lo muestra la Figura 1.8. Para cada material se realizaron tres repeticiones

Tabla AVII. 1. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Primera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	32,932	22,775	24,412	24,725
2	32,932	22,775	24,872	24,725
3	33,442	22,775	24,872	24,725
4	33,951	22,775	25,333	25,152
5	34,461	23,182	25,333	25,152
6	34,97	23,589	25,333	25,578
7	35,48	23,589	25,794	26,004
8	36,499	23,995	26,715	26,004
9	37,518	24,402	26,254	26,004
10	38,028	24,809	25,794	26,004
11	39,047	25,215	26,254	26,431
12	39,557	26,029	26,254	26,431
13	40,576	28,062	26,254	26,431
14	41,595	26,842	26,715	26,431
15	42,105	26,842	26,715	27,283
16	42,614	27,249	26,715	26,857
17	43,124	27,656	25,794	26,857
18	44,143	28,876	26,715	26,857
19	45,162	28,876	27,175	26,857
20	46,182	29,282	27,175	26,857
21	46,691	29,689	27,636	26,857
22	47,201	30,096	27,636	26,857

Tabla AVII. 1. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Primera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
23	48,22	30,502	27,636	27,283
24	49,239	30,909	27,636	27,283
25	50,258	31,723	28,097	27,283
26	50,768	31,723	28,097	27,283
27	51,278	32,129	28,097	27,283
28	51,787	32,536	28,097	27,71
29	52,806	32,943	28,097	27,71
30	53,316	33,349	28,097	27,71
31	53,826	33,349	28,557	27,71
32	54,335	34,163	28,557	27,71
33	54,845	33,756	28,557	27,71
34	55,864	34,569	28,557	28,136
35	56,374	34,976	29,018	26,857
36	56,883	35,383	29,018	28,136
37	57,393	35,383	29,018	28,562
38	57,902	36,196	29,018	28,136
39	58,412	36,196	29,478	28,136
40	58,922	36,603	29,018	28,136
41	59,431	37,01	29,018	28,562
42	59,941	37,01	29,478	28,562
43	60,96	37,823	29,478	28,562
44	61,47	37,823	29,939	28,562
45	61,979	38,23	29,939	28,562
46	61,979	39,043	29,939	28,988
47	62,489	38,23	29,939	28,562
48	61,47	37,416	29,018	27,71
49	60,45	37,823	29,018	27,71
50	60,96	38,23	29,018	26,857
51	60,96	38,23	29,018	27,71
52	60,96	38,23	29,018	27,71
53	60,96	38,23	28,557	27,71

Tabla AVII. 2. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Segunda repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	27,326	18,302	20,266	20,462
2	27,836	18,302	20,266	20,462
3	27,836	18,302	19,806	20,889
4	28,346	18,708	20,266	20,889
5	28,346	19,115	20,266	21,315
6	29,365	19,115	20,727	21,315
7	29,874	19,522	20,727	21,741
8	30,894	19,928	21,188	22,168
9	31,403	19,928	21,188	22,168
10	32,422	20,742	21,188	21,741
11	32,932	21,148	21,648	22,168
12	33,951	21,555	21,648	22,594
13	34,461	21,962	21,648	22,594
14	35,48	22,369	22,109	22,594
15	35,99	22,775	22,109	23,02
16	37,009	23,182	22,109	22,594
17	37,518	23,589	22,109	23,02
18	38,538	23,995	22,569	23,02
19	39,047	24,402	22,569	23,447
20	41,086	25,215	23,03	23,02
21	41,086	25,215	23,03	23,02
22	41,595	25,622	23,03	23,447
23	42,105	26,029	23,03	23,447
24	43,124	26,436	23,03	23,447
25	43,634	26,842	23,491	23,447
26	44,143	26,842	23,491	23,447
27	45,162	27,656	23,491	23,873
28	45,672	27,656	23,491	23,873
29	46,182	28,469	23,951	23,873
30	47,201	28,469	23,951	23,873
31	47,71	28,876	23,951	23,873

Tabla AVII. 2. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Segunda repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	48,22	29,282	23,951	23,873
33	48,73	29,282	24,412	23,873
34	49,749	30,096	24,412	24,299
35	50,258	30,502	24,412	24,299
36	50,768	30,502	24,412	24,299
37	51,278	30,909	24,872	24,725
38	51,787	31,316	24,872	24,299
39	52,297	31,723	24,872	24,725
40	52,806	31,723	24,872	24,725
41	53,316	32,129	25,333	24,725
42	53,826	32,536	25,333	25,152
43	54,335	32,943	25,333	24,725
44	55,354	33,349	25,794	25,152
45	55,864	33,349	25,794	25,152
46	56,374	33,756	25,794	25,578
47	56,374	34,163	26,254	25,152
48	56,883	34,163	26,254	26,004
49	57,393	34,569	26,254	25,578
50	57,902	34,976	26,715	25,578
51	58,412	34,976	26,715	25,578
52	58,922	35,383	26,715	26,004
53	58,922	35,383	26,715	26,004
54	59,941	35,79	27,175	26,004
55	60,45	36,196	27,175	26,431
56	60,45	36,603	27,175	26,431
57	60,96	36,603	27,636	26,431

Tabla AVII. 3. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Tercera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	34,143	22,369	20,727	21,315
2	34,653	22,775	21,188	21,315
3	35,162	22,775	21,188	21,315
4	36,182	23,182	21,188	20,889
5	36,691	23,182	21,648	21,315
6	37,71	23,589	21,648	21,315
7	37,71	23,995	21,648	21,315
8	38,73	23,995	21,648	21,315
9	39,239	24,402	22,109	21,741
10	39,749	24,809	22,109	21,741
11	40,258	24,809	22,109	21,741
12	40,768	24,809	22,109	21,741
13	41,278	24,809	22,109	22,168
14	41,787	25,215	22,569	21,741
15	42,297	25,622	22,569	22,168
16	42,806	25,622	22,569	22,168
17	43,316	25,622	22,569	22,594
18	43,826	26,029	22,569	22,168
19	44,335	26,029	23,03	22,594
20	44,845	26,436	23,03	22,594
21	45,354	26,842	23,03	22,594
22	45,864	26,842	23,491	22,594
23	45,864	27,249	23,491	22,168
24	46,374	27,249	23,491	23,02
25	48,412	27,249	23,951	23,02
26	47,393	27,656	23,951	23,02
27	47,902	27,656	23,951	23,447
28	47,393	28,062	23,951	23,447
29	48,922	28,062	24,412	23,447
30	48,922	28,469	24,412	23,447
31	49,431	28,469	24,412	23,873
32	49,941	28,876	24,412	23,873

Tabla AVII. 3. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material de poliuretano. Tercera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
33	50,45	29,282	24,412	23,873
34	50,96	29,282	24,872	23,873
35	51,47	29,282	24,872	23,447
36	51,47	29,689	24,872	24,299
37	51,979	29,689	25,333	24,299
38	52,489	30,096	25,333	24,299
39	52,998	30,096	25,333	24,299
40	53,508	30,502	25,333	24,725
41	53,508	30,502	25,333	24,725
42	54,018	30,909	25,794	24,725
43	54,527	30,909	25,794	24,725
44	55,037	31,316	25,794	24,725
45	55,037	30,909	26,254	25,152
46	55,546	31,723	26,254	25,152
47	56,056	31,723	26,254	25,152
48	56,056	31,723	26,254	25,152
49	56,566	32,129	26,715	25,152
50	57,075	32,129	26,715	28,136
51	57,075	32,536	26,715	25,578
52	57,585	32,536	26,715	25,578
53	58,094	32,943	27,175	26,004
54	58,094	32,943	26,715	26,004
55	58,604	32,943	27,175	26,004
56	59,114	33,349	27,636	26,857
57	59,114	33,349	27,175	26,431
58	59,623	33,756	27,636	26,431
59	60,133	34,163	27,636	26,431

Tabla AVII. 4. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Primera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	36,182	24,402	23,951	28,562
2	37,71	24,402	23,951	25,152
3	37,71	24,402	24,412	25,152
4	37,201	24,402	24,412	25,152
5	37,71	24,809	24,872	25,578
6	37,71	24,809	24,872	25,578
7	38,22	24,809	25,333	26,004
8	38,73	25,215	25,333	26,004
9	39,749	25,215	25,794	26,004
10	39,749	25,622	25,794	26,431
11	41,278	25,622	25,794	26,431
12	42,297	25,622	26,254	26,431
13	43,316	26,029	26,254	26,431
14	43,316	26,029	26,254	26,857
15	43,316	26,029	26,715	26,857
16	45,354	26,436	26,715	26,857
17	45,354	26,436	26,715	27,283
18	45,354	26,842	26,715	26,857
19	46,374	26,842	27,175	26,857
20	46,883	26,842	27,175	27,283
21	47,393	27,249	27,175	27,283
22	48,412	27,656	27,636	27,283
23	48,412	27,656	27,636	27,283
24	50,45	28,062	27,636	27,71
25	51,47	27,656	27,636	27,71
26	51,979	28,062	28,097	27,71
27	53,508	28,062	28,097	28,136
28	54,018	28,469	28,097	27,71
29	53,508	28,469	28,097	28,136
30	54,527	28,876	28,097	28,136
31	54,527	28,876	28,557	28,136

Tabla AVII. 4. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Primera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	54,527	28,876	28,557	28,136
33	55,037	29,282	28,557	28,136
34	56,056	29,282	28,557	28,562
35	56,566	29,689	29,018	28,562
36	56,566	29,689	29,018	28,136
37	57,585	29,689	28,557	28,562
38	58,094	30,096	29,018	28,562
39	58,094	30,096	29,018	28,562
40	58,604	30,502	29,478	28,562
41	59,114	30,502	29,478	28,562
42	59,623	30,502	29,478	28,988
43	60,133	30,909	29,478	28,562

Tabla AVII. 5. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Segunda repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	36,182	18,708	20,266	20,036
2	36,691	18,708	20,266	20,036
3	37,201	19,115	20,266	20,036
4	37,71	19,115	20,266	20,036
5	38,22	19,115	20,266	20,462
6	38,73	19,115	20,727	20,036
7	39,239	19,522	20,727	20,036
8	39,749	19,115	20,266	20,036
9	40,258	19,522	20,727	20,462
10	40,768	19,115	20,727	20,462
11	41,278	19,522	20,727	20,462
12	41,787	19,522	20,727	20,462
13	41,787	19,522	20,727	20,462

Tabla AVII. 5. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
14	43,316	19,522	21,188	20,462
15	43,316	19,928	21,188	20,462
16	43,316	19,928	21,188	20,462
17	43,826	19,928	21,648	20,889
18	44,335	19,928	21,648	20,462
19	44,845	19,928	21,648	20,462
20	44,845	19,928	21,648	20,889
21	45,354	19,928	21,648	20,889
22	45,864	20,335	21,648	20,889
14	43,316	19,522	21,188	20,462
23	46,374	20,335	21,648	20,889
24	46,883	20,335	22,109	20,889
25	45,864	20,335	22,109	20,889
26	47,393	20,742	22,109	21,315
27	47,902	20,742	22,109	20,889
28	47,902	20,742	22,109	21,315
29	48,412	20,742	22,109	21,315
30	48,412	20,742	22,109	20,889
31	48,922	20,742	22,569	21,315
32	49,431	21,148	22,569	21,741
33	49,431	21,148	22,569	21,741
34	48,412	21,148	22,569	21,741
35	50,45	21,148	22,569	21,741
36	50,96	21,148	23,03	21,741
37	50,96	21,148	22,569	21,741
38	51,47	21,555	23,03	21,741
39	51,979	21,555	23,03	21,315
40	51,979	21,555	23,03	21,741
41	52,489	21,555	23,491	22,168
42	52,489	21,555	23,491	22,168
43	52,998	21,962	23,491	21,315

Tabla AVII. 5. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

44	53,508	21,962	23,491	22,168
45	53,508	21,962	23,491	22,168
46	54,018	21,962	22,569	22,168
47	54,527	21,962	23,03	22,594
48	54,527	22,369	23,951	22,594
49	55,037	22,369	23,951	22,594
50	54,018	22,369	23,951	22,594
51	55,037	22,369	23,951	22,594
52	56,056	22,775	23,951	23,02
53	56,056	22,369	23,951	22,594
54	56,056	22,775	24,412	23,02
55	56,566	22,775	24,412	23,02
56	56,566	23,182	24,412	23,02
57	57,075	23,182	24,412	23,02
58	57,075	23,182	24,412	23,02
59	57,585	23,182	24,412	23,447
60	57,585	23,182	24,412	23,447
61	58,094	23,589	24,872	23,447
62	58,094	23,589	25,333	23,447
63	59,114	23,589	24,872	23,873
64	58,604	23,589	25,333	23,873
65	59,114	23,589	25,333	23,873
66	59,623	23,995	25,333	23,873
67	60,133	23,995	25,333	23,873
68	60,642	23,995	25,794	24,299

Tabla AVII. 6. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Tercera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	27,518	23,589	23,951	24,299
2	28,538	23,589	23,951	24,299
3	29,047	23,995	23,951	24,725
4	30,066	24,402	24,412	24,725
5	31,086	24,809	23,951	24,725
6	31,595	24,809	24,412	24,725
7	32,614	25,215	24,412	24,725
8	33,124	25,622	24,872	24,725
9	34,143	26,029	24,872	24,725
10	34,653	26,842	24,872	24,725
11	35,672	27,249	24,872	24,725
12	36,182	27,656	24,872	25,152
13	37,201	28,062	25,333	25,152
14	37,71	28,469	25,333	25,152
15	38,22	28,876	25,333	25,152
16	39,239	29,282	25,333	25,152
17	39,749	29,689	25,333	24,725
18	40,258	29,689	25,794	25,152
19	40,768	30,096	25,794	25,578
20	41,787	30,502	25,794	25,578
21	42,297	30,909	25,794	25,578
22	42,806	30,909	25,794	25,578
23	43,826	31,316	25,794	25,578
24	44,335	31,723	26,254	26,004
25	44,845	31,723	25,794	25,578
26	45,354	32,536	26,254	26,004
27	45,864	32,536	26,254	26,004
28	46,374	32,943	26,254	26,004
29	46,883	33,349	26,254	26,004
30	47,393	33,349	26,254	26,004
31	47,902	33,756	26,254	26,004

Tabla AVII. 6. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso. Tercera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	48,412	34,163	26,254	26,004
33	48,922	34,163	26,254	26,431
34	49,941	34,569	26,715	26,431
35	49,941	34,569	26,715	26,431
36	50,45	34,976	26,715	26,431
37	50,96	35,383	26,715	26,431
38	51,47	35,383	26,715	26,431
39	51,979	35,79	26,715	26,857
40	52,489	35,79	26,715	27,283
41	52,489	36,196	26,715	26,857
42	52,998	36,196	26,715	25,152
43	54,018	36,603	26,715	26,857
44	54,018	37,01	27,175	26,857
45	54,527	37,416	26,715	26,857
46	54,527	37,416	27,175	26,857
47	55,546	37,823	27,175	27,283
48	56,056	37,823	27,175	27,283
49	56,056	37,823	27,175	27,283
50	56,566	38,23	27,175	27,283
51	56,566	38,636	27,175	27,283
52	57,075	38,636	27,175	27,283
53	57,585	38,636	27,175	27,71
54	58,094	39,043	27,636	27,71
55	58,604	39,043	27,175	27,71
56	58,604	39,45	27,175	27,71
57	59,114	39,857	27,636	27,71
58	59,114	39,857	27,636	27,71

Tabla AVII. 7. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	22,932	19,522	19,806	20,462
2	23,442	19,928	19,806	20,462
3	24,461	19,928	19,806	20,462
4	24,97	20,335	20,266	20,462
5	25,99	20,335	20,266	20,462
6	27,009	20,335	20,266	20,462
7	27,518	20,742	20,266	20,889
8	28,538	20,742	20,266	20,889
9	29,047	21,148	20,727	20,889
10	30,066	21,148	20,727	20,889
11	31,086	21,555	20,727	20,889
12	31,595	21,555	20,727	20,889
13	32,105	21,962	20,727	20,889
14	33,124	21,962	20,727	20,889
15	33,124	22,369	20,727	20,889
16	34,143	22,369	20,727	21,315
17	35,162	22,369	21,188	20,889
18	35,672	22,775	21,188	20,889
19	36,182	22,775	21,188	21,315
20	37,201	23,182	21,648	21,315
21	37,71	23,182	21,188	20,889
22	38,22	23,182	21,648	21,315
23	38,73	22,369	20,266	21,315
24	39,239	23,589	21,648	21,315
25	40,258	23,995	21,648	21,315
26	40,258	23,995	22,109	21,315
27	41,278	24,402	22,109	21,741
28	41,278	24,402	21,648	21,315
29	42,297	24,809	22,109	21,741
30	42,297	24,809	22,109	21,741
31	42,806	24,809	22,109	21,741

Tabla AVII. 7. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	43,826	25,215	22,569	21,741
33	44,335	25,215	22,569	21,741
34	44,845	25,622	22,569	21,741
35	44,845	26,029	22,569	22,168
36	45,864	26,029	22,569	22,168
37	45,864	26,029	23,03	22,168
38	46,374	26,029	23,03	22,168
39	46,883	26,029	23,03	22,168
40	47,393	26,436	23,03	22,168
41	47,902	26,842	23,03	22,594
42	48,412	26,842	23,491	22,594
43	48,922	26,842	23,491	22,594
44	48,922	26,842	23,491	22,594
45	49,431	27,249	23,491	22,594
46	50,45	27,249	23,951	22,594
47	50,45	27,656	23,491	23,02
48	50,96	27,656	23,951	23,02
49	51,47	28,062	23,951	22,168
50	51,979	28,062	24,412	23,02
51	52,489	28,469	23,951	23,02
52	52,998	28,469	24,412	23,447
53	52,998	28,876	24,872	23,447
54	53,508	28,876	24,412	23,447
55	54,018	28,876	24,872	23,873
56	54,527	28,876	24,872	23,873
57	54,527	29,282	24,872	23,873
58	55,037	29,282	25,333	23,873
59	55,546	29,689	25,333	24,299
60	56,056	29,689	25,333	24,299
61	56,056	29,689	25,333	24,299
62	56,566	30,096	25,794	24,725

Tabla AVII. 7. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición (continuación...)

63	56,566	30,096	25,794	24,725
64	57,075	30,502	25,794	24,299
65	57,585	30,502	25,794	25,152
66	58,094	30,909	26,254	25,152
67	58,094	30,909	26,254	25,152
68	58,604	30,909	26,715	25,152
69	59,114	31,316	26,254	25,578
70	59,623	31,723	26,715	25,578
71	60,133	31,723	27,175	25,578

Tabla AVII. 8. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	27,518	21,555	22,109	26,857
2	27,518	22,369	22,569	25,578
3	28,028	22,775	22,569	25,578
4	28,538	23,182	23,03	25,578
5	29,047	23,182	23,491	25,578
6	29,557	23,589	23,491	25,578
7	30,576	23,995	23,951	25,578
8	31,086	23,995	23,951	25,578
9	32,105	23,995	24,412	25,578
10	32,614	24,402	24,872	25,578
11	33,634	24,809	23,951	25,578
12	34,143	25,215	24,872	25,578
13	35,162	25,622	25,333	25,152
14	36,182	25,622	25,333	26,004
15	36,691	26,029	25,333	25,578
16	37,201	26,436	25,794	26,431
17	38,22	26,842	25,333	25,578
18	39,239	26,842	25,794	25,578

Tabla AVII. 8. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
19	39,749	27,249	26,254	25,578
20	40,258	27,249	26,254	26,004
21	41,278	27,249	26,254	25,578
22	42,297	27,656	26,254	25,578
23	42,806	28,062	26,254	25,578
24	43,316	28,062	26,254	25,578
25	43,826	28,062	26,254	25,578
26	44,845	28,469	26,715	25,578
27	45,354	28,469	26,715	26,004
28	45,864	28,876	27,175	26,004
29	46,374	29,282	27,175	26,004
30	46,883	29,282	27,175	26,004
31	47,393	29,282	27,175	26,004
32	47,902	29,689	27,175	26,004
33	48,412	30,096	27,175	26,004
34	48,922	30,096	27,636	26,004
35	49,431	30,096	27,175	26,004
36	49,941	30,502	27,636	26,431
37	50,45	30,909	27,636	26,431
38	50,96	30,909	27,636	26,431
39	51,47	30,909	27,636	26,004
40	51,979	30,909	28,097	26,431
41	51,979	31,316	28,097	26,431
42	52,998	31,316	28,097	26,431
43	53,508	31,723	28,097	26,431
44	54,018	32,129	28,097	26,857
45	54,527	32,129	28,097	26,857
46	54,527	32,129	28,557	26,431
47	55,037	32,536	28,557	26,857
48	55,546	32,536	28,557	26,857
49	55,546	32,536	28,557	26,857

Tabla AVII. 8. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

19	39,749	27,249	26,254	25,578
20	40,258	27,249	26,254	26,004
21	41,278	27,249	26,254	25,578
22	42,297	27,656	26,254	25,578
23	42,806	28,062	26,254	25,578
24	43,316	28,062	26,254	25,578
25	43,826	28,062	26,254	25,578
26	44,845	28,469	26,715	25,578
27	45,354	28,469	26,715	26,004

Tabla AVII. 9. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso. Tercera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	49,431	24,809	24,872	20,889
2	50,45	25,622	25,333	25,578
3	50,96	26,029	25,794	26,004
4	51,47	26,436	26,254	26,431
5	52,489	26,842	26,715	26,431
6	53,508	27,249	26,715	27,283
7	54,018	27,656	27,175	27,283
8	55,037	28,062	27,636	27,283
9	55,546	28,469	27,636	27,71
10	56,566	28,469	28,097	27,71
11	57,075	28,876	28,097	27,71
12	57,585	29,282	28,557	28,136
13	56,566	29,689	28,557	28,136
14	58,604	29,689	29,018	28,136
15	59,114	30,096	29,018	28,562
16	60,133	30,502	29,939	28,136

Tabla AVII. 10. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Primera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	33,124	23,589	21,188	21,741
2	34,143	23,995	21,648	21,741
3	34,653	24,402	21,648	21,741
4	35,162	24,809	21,648	22,168
5	35,672	24,809	22,109	22,168
6	36,691	25,215	21,648	22,168
7	37,201	25,215	22,109	22,168
8	37,71	25,622	22,109	22,168
9	38,73	26,029	22,109	22,594
10	38,73	26,029	22,569	22,594
11	39,749	26,436	22,569	22,594
12	39,749	26,842	22,569	22,594
13	40,258	26,842	22,569	22,594
14	40,768	27,249	23,03	22,594
15	41,278	27,249	23,03	22,594
16	41,278	27,656	23,03	23,02
17	42,297	28,062	23,491	23,02
18	43,316	28,469	23,491	23,02
19	43,826	28,469	23,491	23,447
20	43,826	28,876	23,491	23,447
21	44,845	28,876	23,491	23,447
22	45,354	29,282	23,951	23,873
23	45,864	29,282	23,951	23,873
24	45,864	29,689	23,491	23,873
25	46,883	29,282	24,412	26,004
26	46,883	30,096	24,412	23,873
27	47,393	30,502	24,412	24,299
28	47,902	30,502	24,872	24,299
29	48,412	30,909	24,872	24,299
30	48,922	30,909	24,872	24,725
31	49,431	31,316	25,333	24,725

Tabla AVII. 10. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Primera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	49,941	31,723	24,872	26,004
33	49,941	31,723	25,333	24,725
34	50,45	32,129	25,333	24,725
35	50,96	32,129	25,794	25,152
36	51,47	32,536	25,794	25,152
37	51,47	32,536	25,794	25,578
38	51,979	32,536	25,794	26,431
39	52,489	32,943	26,254	25,578
40	52,998	33,349	26,254	25,578
41	53,508	33,349	26,715	25,578
42	53,508	33,756	26,715	26,004
43	54,018	33,756	26,715	26,004
44	54,527	34,163	26,715	26,004
45	54,527	34,163	27,175	26,431
46	55,037	34,569	27,175	26,431
32	49,941	31,723	24,872	26,004
47	55,546	34,569	27,636	26,431
48	56,056	34,976	27,636	26,431
49	56,566	34,976	27,636	26,857
50	56,566	35,383	27,636	26,857
51	57,075	35,383	27,636	26,857
52	57,075	35,383	28,097	26,857
53	57,585	35,79	28,097	27,283
54	58,094	35,79	28,097	27,71
55	58,604	36,196	28,097	27,283
56	58,604	36,196	28,557	27,283
57	59,114	36,603	28,557	27,71
58	59,114	36,603	28,557	27,71
59	59,623	36,603	28,557	27,71

Tabla AVII. 11. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Segunda repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	36,182	21,962	18,885	18,757
2	36,691	22,369	18,885	18,757
3	37,201	22,369	19,345	18,331
4	37,71	22,775	19,345	18,757
5	38,22	22,775	19,345	18,757
6	38,73	23,182	19,806	19,183
7	39,239	23,182	19,345	18,757
8	39,749	23,589	19,806	18,757
9	39,749	23,589	19,806	19,183
10	40,768	23,995	19,806	19,183
11	41,278	23,995	20,266	19,183
12	41,787	23,995	19,806	19,183
13	41,787	24,402	20,266	19,183
14	42,297	24,809	20,266	19,61
15	42,806	24,809	20,266	19,61
16	43,316	24,809	19,345	19,61
17	43,826	25,215	20,727	19,61
18	44,335	25,215	20,727	20,036
19	44,845	25,622	21,188	20,036
20	44,845	26,029	21,188	20,036
21	45,864	26,029	21,188	19,61
22	45,864	26,029	21,188	20,036
23	46,374	26,436	21,188	20,462
24	46,883	26,436	21,648	20,889
25	46,883	26,842	21,648	20,889
26	47,393	26,842	21,648	20,462
27	47,902	27,249	22,109	20,889
28	48,412	27,249	22,109	20,889
29	48,412	27,656	22,109	21,315
30	48,922	27,656	22,109	20,889
31	49,431	28,062	22,569	20,889

Tabla AVII. 11. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	49,941	28,062	22,569	21,315
33	50,45	28,062	22,569	20,036
34	50,45	28,469	22,569	21,315
35	50,96	28,469	23,03	21,315
36	51,47	28,876	23,03	21,741
37	51,979	28,876	23,03	21,741
38	51,979	29,282	22,109	21,741
39	52,489	29,282	23,491	22,168
40	52,998	29,282	23,491	22,168
41	52,998	29,689	23,491	22,168
42	53,508	29,689	23,951	22,168
43	52,998	30,096	23,951	22,168
44	54,018	30,096	23,951	22,594
45	54,527	30,502	24,412	22,594
46	54,527	30,502	24,412	22,594
47	55,037	30,502	24,412	23,02
48	55,037	30,909	24,412	23,02
49	55,546	30,909	24,412	23,02
50	55,546	31,316	24,872	23,02
51	56,056	31,316	24,872	23,02
52	56,566	31,316	24,872	23,447
53	57,075	31,723	24,872	23,447
54	57,075	31,723	25,333	23,447
55	57,075	32,129	25,333	23,447
56	57,585	32,129	25,333	23,873
57	57,585	32,129	25,333	23,873
58	58,094	31,316	25,794	23,873
59	58,604	32,943	25,794	23,873
60	59,114	32,943	25,794	23,873
61	59,114	32,943	25,794	24,299
62	59,623	33,349	26,254	24,725

Tabla AVII. 12. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Tercera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	37,201	24,402	22,109	22,168
2	37,71	24,809	22,569	22,168
3	38,22	25,215	22,569	22,168
4	38,73	25,215	22,569	22,168
5	39,239	25,215	22,569	22,594
6	39,749	26,029	23,03	22,594
7	40,258	25,622	23,03	22,594
8	40,768	26,029	23,03	21,741
9	41,278	26,436	23,03	23,02
10	41,787	26,436	23,491	23,02
11	42,297	26,436	23,491	23,02
12	42,806	26,842	23,491	23,02
13	43,316	27,249	23,491	23,447
14	43,826	27,249	23,951	23,447
15	44,335	27,656	23,951	23,447
16	44,845	27,656	23,951	23,447
17	45,354	28,062	24,412	23,873
18	45,354	28,062	24,412	23,873
19	46,374	28,469	24,412	23,873
20	46,374	28,469	24,412	23,873
21	46,883	28,876	24,412	23,02
22	47,393	28,876	24,872	24,299
23	47,902	29,282	24,872	24,299
24	48,412	29,282	24,872	24,299
25	48,412	29,689	24,872	24,725
26	48,922	29,689	25,333	24,725
27	49,431	30,096	25,333	24,725
28	49,431	30,096	25,794	24,725
29	49,941	30,502	25,794	25,152
30	50,45	30,502	25,794	25,152
31	50,96	30,909	25,794	25,578

Tabla AVII. 12. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso. Tercera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	51,47	30,909	26,254	25,152
33	51,47	31,316	25,794	25,578
34	51,979	31,316	26,254	25,578
35	52,489	31,723	26,254	25,578
36	52,998	31,723	26,254	25,578
37	53,508	32,129	26,715	25,578
38	53,508	32,129	26,715	26,004
39	54,018	32,129	26,715	26,004
40	54,527	32,536	27,175	26,004
41	54,527	32,536	27,175	26,431
42	55,037	32,943	27,175	26,431
43	55,546	32,943	27,175	26,431
44	55,546	33,349	27,636	26,857
45	56,056	33,349	27,636	26,857
46	56,566	33,756	27,636	26,857
47	57,075	33,756	27,636	26,857
48	57,585	34,569	28,097	26,857
49	57,075	34,163	28,097	27,283
50	57,585	34,569	28,557	27,283
51	58,094	34,569	28,557	27,283
52	58,094	34,569	28,097	27,283
53	58,604	34,976	28,557	27,71
54	59,114	34,976	28,557	27,71
55	59,114	35,383	29,018	27,71
56	59,623	35,383	29,018	27,71

Tabla AVII. 13. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	33,634	26,029	26,715	26,857
2	34,143	26,436	27,175	27,283
3	35,162	26,436	27,175	27,283
4	36,182	27,249	27,175	27,283
5	36,691	27,249	27,175	28,136
6	37,71	27,656	27,636	27,283
7	38,22	27,656	27,636	27,71
8	39,239	28,062	27,636	27,71
9	39,749	28,062	27,636	27,71
10	40,768	28,062	28,097	27,71
11	41,278	28,469	28,097	27,71
12	41,787	28,876	28,097	27,71
13	42,806	28,876	28,097	28,136
14	41,787	29,282	28,557	28,136
15	43,826	29,282	28,557	28,136
16	44,845	29,689	28,557	28,136
17	45,354	30,096	29,018	28,136
18	45,864	30,096	29,018	28,136
19	46,374	30,502	29,018	28,562
20	47,393	30,502	29,478	28,562
21	47,902	30,909	29,018	28,562
22	48,412	31,316	29,478	28,562
23	48,922	31,316	29,478	28,562
24	49,431	31,723	29,478	28,562
25	49,941	31,723	29,478	28,988
26	50,45	32,129	29,939	28,988
27	50,96	32,129	29,939	28,988
28	51,47	32,129	29,939	28,988
29	51,979	32,536	29,939	28,988
30	52,998	32,536	29,939	28,988
31	52,998	32,943	30,4	29,415

Tabla AVII. 13. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Primera repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
32	53,508	32,943	30,4	29,415
33	54,018	33,349	30,4	29,415
34	55,037	33,349	30,86	29,415
35	55,037	33,756	30,86	29,841
36	55,546	33,756	31,321	29,841
37	56,056	34,163	31,321	29,841
38	56,566	34,163	31,321	29,841
39	56,566	34,569	31,321	29,841
40	57,585	34,569	31,321	29,841
41	57,585	34,976	31,781	29,841
42	58,094	34,976	31,781	29,841
43	58,604	34,976	31,781	30,267
44	59,114	35,383	31,781	28,988

Tabla AVII. 14. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	27,009	21,148	19,345	20,036
2	28,028	21,555	19,345	20,036
3	28,538	21,555	19,806	20,036
4	29,047	22,369	19,806	20,462
5	30,066	22,775	19,806	20,036
6	31,086	22,775	19,806	19,183
7	31,595	23,589	20,266	20,462
8	32,105	23,589	20,266	20,462
9	32,614	23,589	20,266	20,462
10	33,124	23,995	20,266	20,462
11	33,634	24,402	20,266	20,462
12	34,653	24,809	20,727	20,889
13	35,162	25,215	20,727	20,889

Tabla AVII. 14. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
14	35,672	25,622	21,188	20,889
15	36,182	25,622	21,188	20,889
16	37,201	26,029	21,188	20,889
17	37,71	26,436	21,188	21,315
18	38,22	26,842	21,648	21,315
19	38,73	27,249	21,648	21,315
20	38,73	27,656	21,648	21,741
21	39,749	27,656	21,648	21,741
22	40,258	28,062	22,109	21,741
23	41,278	28,469	22,109	22,168
24	41,278	28,469	22,109	21,741
25	41,787	28,876	22,109	22,168
26	42,297	29,282	22,569	22,168
27	42,806	29,689	22,569	22,168
28	43,316	29,689	23,03	22,168
29	43,826	30,096	23,03	22,594
30	44,335	30,502	23,03	22,594
31	44,845	30,909	23,491	22,594
32	45,354	30,909	23,491	22,594
33	45,864	31,723	23,491	22,594
34	46,374	31,723	23,491	23,02
35	46,374	31,723	23,951	23,02
36	47,393	32,129	23,951	23,447
37	47,902	32,536	23,951	23,447
38	47,902	32,536	24,412	23,447
39	48,412	32,536	24,412	23,447
40	48,922	33,349	24,412	23,447
41	49,431	33,349	24,412	23,873
42	49,431	33,756	24,872	24,299
43	49,941	34,163	24,872	23,873
44	50,45	34,163	25,333	24,299

Tabla AVII. 14. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Segunda repetición (continuación...)

45	50,96	34,569	25,333	24,299
46	51,47	34,569	25,333	24,299
47	51,979	34,976	25,333	24,299
48	51,979	35,383	25,333	24,725
49	52,489	35,383	25,794	24,725
50	52,998	35,79	25,794	25,152
51	54,018	36,196	26,254	25,152
52	54,018	36,196	26,254	25,152
53	54,527	36,603	26,254	25,578
54	55,037	36,603	26,715	25,578
55	55,037	37,01	26,715	25,578
56	55,546	37,01	27,175	26,004
57	55,546	37,416	26,715	25,578
58	56,056	37,823	27,175	26,004
59	56,566	37,823	27,175	26,431
60	57,585	38,23	27,636	26,431
61	58,094	38,636	28,097	26,857
62	58,604	39,043	28,097	26,857
63	58,604	39,45	28,557	27,283
64	59,114	39,45	28,557	26,857
65	59,623	39,857	28,557	27,283
66	60,133	39,857	28,557	27,283
67	60,133	40,263	29,018	27,71

Tabla AVII. 15. Resultado de las temperaturas obtenidas en el ensayo de conductividad térmica para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso. Tercera repetición

	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura 4
1	40,258	27,656	27,175	27,283
2	40,258	28,469	27,636	27,71
3	41,787	28,469	27,636	27,71
4	42,297	28,876	28,097	28,136
5	42,806	28,876	28,097	28,136
6	43,316	29,282	28,557	28,136
7	44,335	29,689	28,557	28,136
8	45,354	30,096	29,018	28,136
9	45,864	30,096	29,018	28,562
10	46,374	30,502	29,478	28,562
11	47,902	30,909	29,018	28,136
12	46,374	31,316	29,478	28,988
13	48,922	31,316	30,4	28,562
14	49,431	31,723	29,939	28,562
15	49,941	31,723	29,939	28,988
16	50,96	32,129	30,4	28,562
17	50,96	32,536	30,4	28,988
18	51,979	32,536	30,4	28,988
19	52,489	32,943	30,4	28,988
20	52,998	33,349	30,4	28,988
21	53,508	33,349	30,86	29,415
22	54,018	33,756	30,86	28,988
23	55,037	33,756	30,86	29,415
24	55,546	33,756	30,86	29,415
25	56,056	34,163	31,321	29,415
26	56,566	34,569	31,321	29,415
27	57,075	34,569	31,321	29,415
28	57,585	34,976	31,321	29,415
29	57,585	34,976	31,321	29,415
30	58,094	34,976	31,781	29,415
31	58,604	35,79	31,781	29,415

Para el cálculo del coeficiente de conductividad térmica, el valor del gradiente de temperatura es tomado cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio, es decir, se toman los últimos valores de temperatura. Para el ejemplo de cálculo, se tomará como referencia a los datos obtenidos para el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso (primera repetición).

Usando la ecuación [1.10] explicada en el punto 1.3.2.3, se realiza el cálculo del coeficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos desarrollados en el presente proyecto:

$$k_M = \frac{P * L * k_{Cu}}{k_{Cu} * A * \Delta T - 2 * P * L} \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Donde:

k es la conductividad térmica propia del material (W/m*K)

P es la potencia eléctrica que se suministra al sistema (W)

L es el espesor de las placas

A es área transversal de las placas

ΔT es el gradiente de temperatura ($T_1 - T_4$)

El área transversal de contacto y el espesor de todas las placas son iguales. De la ecuación [1.10] todos los valores son constantes excepto por el gradiente de temperatura que es el parámetro que varía en función del material evaluado. Los valores de los parámetros utilizados para el cálculo del coeficiente de conductividad térmica están detallados en la Tabla AVII. 16.

Tabla AVII. 16. Parámetros usados para el cálculo del coeficiente de conductividad térmica

Parámetro	Valor
Potencia eléctrica (P)	6 [W]
Espesor de placas (L)	0,01 [m]
Área transversal de placas (A)	0,00621 [m ²]
Conductividad térmica de las placas de cobre (k_{Cu})	393 [W/mK]

Reemplazando los valores de los parámetros de la Tabla AVII. 16 y el gradiente de temperatura de la Tabla AVII. 13 en la ecuación [1.10], se tiene:

$$k_M = \frac{6 * 0,01 * 393}{393 * 0,00621 * (59,114 - 28,988) - 2 * 6 * 0,01} \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$k_M = 0,321 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

A continuación se muestran las gráficas de medianas obtenidas con el software Statgraphics para el análisis estadístico del coeficiente de conductividad térmica. Las variables son el tratamiento químico realizados a las fibras y el tipo de material compuesto desarrollado.

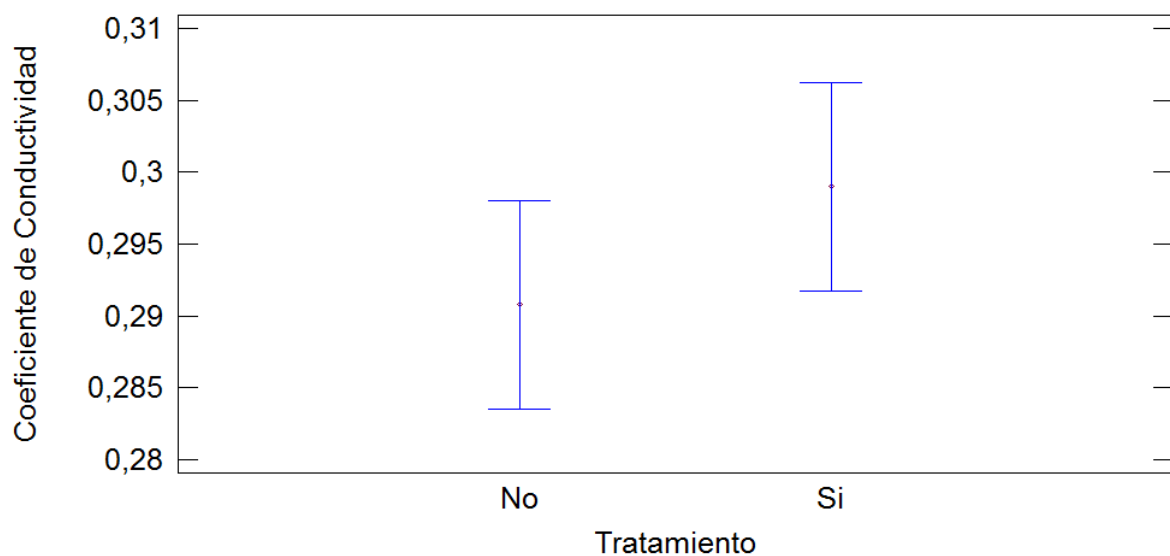


Figura AVII. 1. Gráfica de medianas para el coeficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos con la variable de tratamiento químico

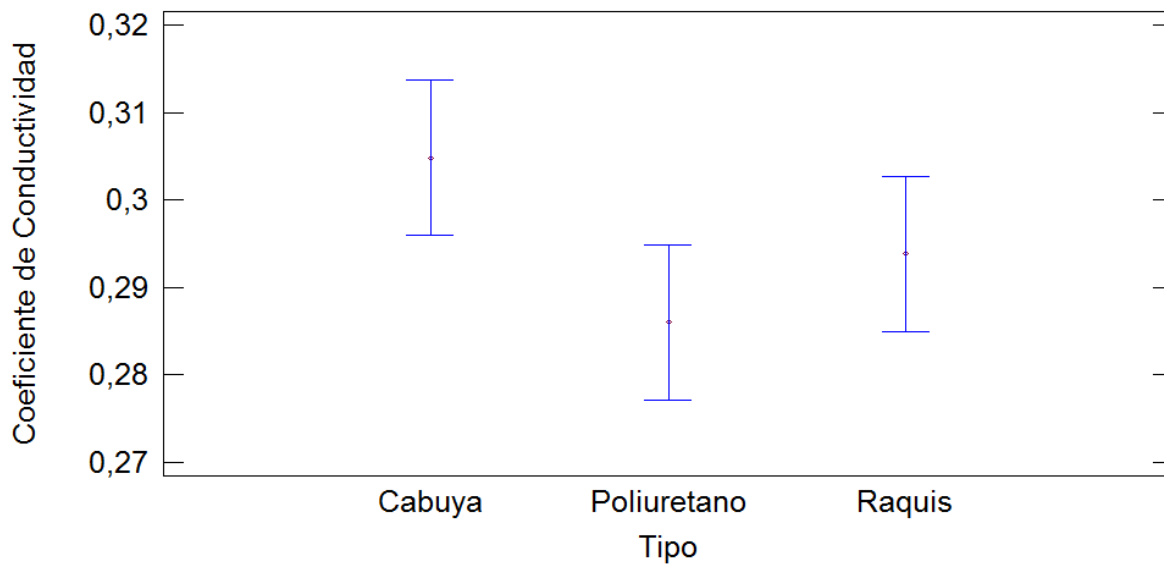


Figura AVII. 2. Gráfica de medianas para el coeficiente de conductividad térmica de los materiales compuestos con la variable de tipo de material

ANEXO VIII

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS

De la Tabla AVIII. 1 hasta la Tabla AVIII. 5 se muestran los niveles de presión sonora que se obtuvieron al medir la fuente de ruido confinada con los distintos tipos de materiales compuestos desarrollados. El análisis de la presión sonora fue realizado en bandas de octava. La medición de presión sonora se la realizó en cuatros alrededor de la fuente, de estos cuatro valores se obtuvo un valor de presión sonora promedio, utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{p \text{ total}} = 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1 L_{p i}} \right]$$

Se realiza un ejemplo de cálculo del nivel de presión sonora equivalente para los primeros datos que se muestran en la Tabla AVII. 1:

$$L_{p \text{ total}} = 10 \log \left[\frac{1}{4} (10^{0,1 \cdot 60,5} + 10^{0,1 \cdot 61,6} + 10^{0,1 \cdot 62,4} + 10^{0,1 \cdot 65}) \right]$$

$$L_{p \text{ total}} = 62,7 \text{ [dB]}$$

Tabla AVIII. 1. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (dB) en bandas de octava para la fuente de ruido sin confinamiento

	$L_{p 1}$	$L_{p 2}$	$L_{p 3}$	$L_{p 4}$	$L_{p \text{ total}}$
31,5 Hz	60,5	61,6	62,4	65	62,7
63 Hz	66,3	66,2	66,7	66,8	66,5
125 Hz	66,8	65,7	65,9	65,9	66,1
250 Hz	78,8	79,3	79,7	79,3	79,3
500 Hz	82,4	83,8	81,6	82,6	82,7
1 kHz	77,2	80,1	75,6	78,7	78,2
2 kHz	73	78,9	71,6	72,6	75,1
4 kHz	81,6	87,2	80,7	72,5	83,0
8 kHz	73,5	81,4	71,3	68,2	76,5
16 kHz	55	70,3	56,3	46,6	64,6

Tabla AVIII. 2. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (dB) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material de poliuretano

	$L_p 1$	$L_p 2$	$L_p 3$	$L_p 4$	$L_p total$
31,5 Hz	61,4	63,6	60,4	62,8	62,2
63 Hz	62,9	65	62,4	65	64,0
125 Hz	63,9	62,6	63	63,4	63,3
250 Hz	76,5	77	76,3	76,4	76,6
500 Hz	79,2	78,6	80,4	80,2	79,7
1 kHz	68,8	71,7	69,9	73,1	71,2
2 kHz	61	62,6	63,2	59,8	61,8
4 kHz	61,8	62,1	67,9	58,5	64,0
8 kHz	55,5	57,9	55,3	53,9	55,9
16 kHz	42,9	44,3	42,7	42,6	43,2

Tabla AVIII. 3. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (dB) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana al 15% en peso

	$L_p 1$	$L_p 2$	$L_p 3$	$L_p 4$	$L_p total$
31,5 Hz	62,8	61,2	63	63,1	62,6
63 Hz	64	67	67,1	65,2	66,0
125 Hz	65,5	67,2	65,2	64,3	65,7
250 Hz	79,3	79	80,1	78,2	79,2
500 Hz	79,6	77,8	77,6	78,6	78,5
1 kHz	65,4	74	68,2	70,1	70,6
2 kHz	60,9	60,7	60,8	61,9	61,1
4 kHz	62,7	62,2	64,8	58,9	62,6
8 kHz	53,2	54,3	52,9	50,9	53,0
16 kHz	42,1	42,1	41,2	40,3	41,5

Tabla AVIII. 4. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (dB) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con raquis de palma africana químicamente tratado al 15% en peso

	$L_p 1$	$L_p 2$	$L_p 3$	$L_p 4$	$L_p total$
31,5 Hz	61,7	62,5	62,8	61,7	62,2
63 Hz	66,8	66,1	66,6	66,2	66,4
125 Hz	65,3	66,3	66,7	65,1	65,9
250 Hz	79,4	78,8	79,2	79,8	79,3
500 Hz	77	77,9	78	79,2	78,1
1 kHz	69,7	71,7	63,4	70,9	69,8
2 kHz	57,2	63,7	58,8	61,1	60,9
4 kHz	59,6	61,8	64,2	59,4	61,7
8 kHz	52,3	56,1	53,2	51,4	53,6
16 kHz	40,2	42,7	41	41,3	41,4

Tabla AVIII. 5. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (dB) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con cabuya al 15% en peso

	$L_p 1$	$L_p 2$	$L_p 3$	$L_p 4$	$L_p total$
31,5 Hz	61,1	62,2	62,6	62,1	62,0
63 Hz	66,7	65,3	65,8	66,2	66,0
125 Hz	55,8	66,4	66	66,3	65,1
250 Hz	79,9	78,1	77,6	78,7	78,7
500 Hz	78,1	76,8	78,5	77,3	77,7
1 kHz	68,1	70	68,4	66,3	68,4
2 kHz	59,3	58,8	60,8	59,9	59,8
4 kHz	60,3	62,6	63,2	61,2	62,0
8 kHz	51,6	54	52,9	50,5	52,4
16 kHz	41,5	40,6	39,8	40,6	40,7

Tabla AVIII. 6. Resultados obtenidos de la medición de la presión sonora (dB) en bandas de octava para la fuente de ruido con confinamiento realizado con el material compuesto de poliuretano con cabuya químicamente tratado al 15% en peso

	$L_p 1$	$L_p 2$	$L_p 3$	$L_p 4$	$L_p total$
31,5 Hz	60,1	61,1	62,8	64	62,3
63 Hz	61,9	63,9	62,5	63,4	63,0
125 Hz	61,9	62,6	62,2	62,6	62,3
250 Hz	74,1	74,2	73,6	74,8	74,2
500 Hz	77	77,5	76,4	78,9	77,6
1 kHz	65,2	70,7	61,9	69,3	68,0
2 kHz	57,2	58,6	56,3	60,8	58,6
4 kHz	57,9	62,7	59,1	58,1	59,9
8 kHz	51,6	53,5	55,8	52	53,6
16 kHz	40,5	39,8	40,6	41	40,5

Para el cálculo de la pérdida por transmisión sonora experimental, se lo realiza utilizando la fórmula [1.13] explicada en el punto 1.4.4. Se realiza un ejemplo de cálculo utilizando los primeros datos que se muestran en la Tabla AVIII. 1 y de la Tabla AVII. 2, de la banda de 31,5 Hz:

$$TL = L_P \text{ fuente} - L_P \text{ confinado}$$

$$TL = 62,7 - 62,2 \text{ (dB)}$$

$$TL = 0,5 \text{ (dB)}$$

La transmisión sonora se la puede calcular con base en las propiedades físicas del material, se lo realiza utilizando la fórmula [1.13] explicada en el punto 1.4.4.

$$(TL)_{\text{calculada}} = 20 \log (f * M) - 47$$

Donde:

f es la respectiva frecuencia de las bandas de octava, expresada en (Hz).

M es la masa del material por unidad de superficie, se expresa en (kg/m²)

El cálculo del valor de la masa (M) se lo realizó con base en los resultados obtenidos de densidad detallados en el punto 3.3.2.1, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla AVIII 7.

Tabla AVIII. 7. Resultados obtenidos de la masa por unidad de superficie de los materiales compuestos (kg/m²)

Material	M (kg/m²)
Poliuretano	0,556
Raquis 15% sin acetilación	0,809
Raquis 15% con acetilación	0,816
Cabuya 15% sin acetilación	0,867
Cabuya 15% con acetilación	0,873

Se realiza un ejemplo de cálculo utilizando los primeros datos que se muestran en Tabla AVIII. 2, de la banda de 16 kHz:

$$(TL)_{calculada} = 20 \log(16000 * 0,556) - 47$$

$$(TL)_{calculadas} = 31,98 \text{ (dB)}$$

En la Tabla 3.9 se muestran las pérdidas por transmisión calculadas con base en las propiedades físicas del material. El cálculo se lo hizo en bandas de octava de los distintos tipos de materiales compuestos

Tabla AVIII.8. Pérdidas por transmisión (db) calculadas con base en las propiedades físicas del material compuesto de poliuretano rígido reforzado con fibras naturales

Bandas Material	31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
Poliuretano	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	7,9	13,9	19,9	26,0	32,0
Raquis 15% sin Acetilación	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	11,2	17,2	23,2	29,2	35,2
Raquis 15% con Acetilación	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2	11,3	17,3	23,3	29,3	35,3
Cabuya 15% sin Acetilación	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	11,8	17,8	23,8	29,8	35,8
Cabuya 15% con Acetilación	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8	11,9	17,9	23,9	29,9	35,9

ANEXO IX
PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN DE DISTINTOS MATERIALES

MATERIAL	ESPESOR Mm.	PESO Kg/m ²	CENTROS BANDAS FRECUENCIAS Hz							
			63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
Aluminio	1,0	2,6	8	11	10	11	17	24	25	30
Acero	1,0	7,0	3	7	15	19	25	32	37	39
Acero	1,5	13,0	9	13	22	28	32	38	42	41
Plomo	1,5	17,0	21	29	32	34	32	32	34	37
Plomo	3,0	34,0	25	31	32	28	37	43	33	39
Vidrio	3,0	7,0	11	15	15	20	23	29	26	31
Vidrio	6,0	14,0	17	11	24	29	31	26	36	39
Vidrio	10,0	23,0	19	23	25	32	31	31	40	42
Aglomerado de madera	12,0	4,0	9	11	16	19	26	30	32	36
Madera sólida	50,0	25,0	14	20	22	25	31	38	43	45
Cartón-yeso	10,0	7,0	10	14	21	23	30	31	36	38
Ladrillo hueco sencillo enlucido	60	75	25	31	30	29	30	39	44	49
Ladrillo hueco doble (tabicón)	120	94	27	30	30	32	40	46	52	56
Ladrillo 1/2 pie macizo enlucido	150	185	36	41	35	43	51	59	64	68
Losa hormigón	100	220	31	37	36	45	51	60	62	64
Losa hormigón	300	700	37	41	45	53	60	63	67	72
Puerta ligera	45	9	9	14	17	19	18	21	26	29
Puerta acústica especial	100	---	35	37	40	45	50	57	59	63
Ventana simple marco aluminio	6	---	17	11	24	28	32	28	35	41
Ventana doble marco aluminio	25	63	25	27	30	30	34	44	48	54
Pared ladrillo sencillo enlucidos	----	140	28	34	36	36	38	49	60	67
Pared ladrillo macizo enlucido	----	140	28	33	34	41	55	72	76	79

Figura AIX. 1. Pérdidas por transmisión típicas de distintos materiales
(Esteban, 2012, p. 1)

ANEXO X

CÁLCULOS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO

Cálculo de costo de preparación del material compuesto de poliuretano reforzado con fibra natural

- Costo de la materia prima para el material compuesto

El costo de la fibra de cabuya en el mercado local es de \$ 0,40 por kilogramo de fibra. La fibra de raquis de palma africana no tiene costo ya que se trata de un desecho industrial.

Los costos de la materia prima del poliuretano rígido, poliol e isocianato, es de \$ 4,50 por cada kilogramo de reactivo. El precio fue proporcionado por la empresa QUMIPAC, ubicada en la ciudad de Quito y quienes fueron los que suministraron dichas materias primas.

- Costos de transporte de la fibra natural

El costo de transporte de la fibra fue elaborado con base en el gasto de gasolina diésel de un camión pequeño desde las ciudades de origen de las fibras hasta la ciudad de Quito. Además del costo de gasolina, se incluyó el costo de los peajes y el costo de tres comidas para el chofer quien maneja el camión.

- Costo del consumo energético para la preparación de la fibra

Se calculó el costo del consumo de energía eléctrica para la preparación de 150 kg de fibra, esto incluye: molienda, tamizado y secado. En la Tabla AIX. 1 se indica el análisis de costos, donde se consideró las capacidades y consumo energético de los equipos que se usaron para la preparación de la fibra. Con base en el proyecto de titulación de Arroyo y Loyo (2015), se utilizaron los equipos que se mencionan a continuación (pp. 176-179):

Tabla AX.1. Consumo energético requerido para la preparación de fibra

Equipo	Capacidad (kg/h)	Potencia (kW)	Horas de funcionamiento por lote (h/lote)	Energía gastada por lote (kW/lote)
Molino de cuchillas	160	5,50	1	5,50
Tamiz vibratorio	800	5,50	0,5	2,75
Secador	400	2,20	4	8,80
			Total	17,05

Se consideró que 1kW tiene un valor de \$ 0,10. Por lo tanto:

Consumo energético por lote = 17,05 kW

Costo energético por lote = \$ 1,71