



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA  
EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA**

**MAESTRIA EN CIENCIAS EN CONSERVACION Y APROVECHAMIENTO  
DE RECURSOS NATURALES**

**ACADEMIA DE INGENIERIA**

**“DISEÑO DE UN PANEL MODULAR BIOCMPUESTO CON CARACTERÍSTICAS DE  
ABSORCIÓN ACÚSTICA EMPLEANDO COMO REFUERZO FIBRAS DE BAGAZO DE  
*AGAVE ANGUSTIFOLIA* HAW Y MATRIZ POLIMÉRICA”**

**PRESENTA:**

**AURELIO MARTÍNEZ IBARRA**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**DIRECTOR:**

**DR. RAFAEL ALAVÉZ RAMÍREZ**

**CODIRECTOR:**

**DR. FERNANDO CHIÑAS CASTILLO**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las 13:00 horas del día 19 del mes de junio del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:  
Diseño de un panel modular biocompuesto con características de absorción acústica empleando como refuerzo fibras de Bagazo de Agave Angustifolia Haw y matriz polimérica

Presentada por el alumno:

<u>Martínez</u>	<u>Ibarra</u>							
Apellido paterno	Apellido materno							
Nombre(s) <u>Aurelio</u>	Con registro: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> </table>	A	1	5	0	0	7	2
A	1	5	0	0	7	2		

aspirante de:


Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA


Directores de tesis

  
Dr. Rafael Alavéz Ramírez

  
Dr. Fernando Chinas Castillo

  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús  
Cano Barrita

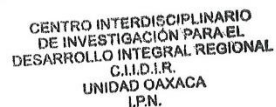
  
Dr. Magdalena Caballero Caballero

  
Dr. Miguel Chávez Gutiérrez

  
Dr. Francisco Castellanos León

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F. el día 20 del mes de junio del año 2017, el (la) que suscribe MARTÍNEZ IBARRA AURELIO alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES, con número de registro A150072, adscrito(a) al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) **Dres. Rafael Alavéz Ramírez y Fernando Chiñas Castillo** y cede los derechos del trabajo titulado Diseño de un panel modular biocompuesto con características de absorción acústica empleando como refuerzo fibras de Bagazo de Agave Angustifolia Haw y matriz polimérica.al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones [posgradoax@hotmail.com](mailto:posgradoax@hotmail.com) ó [aurelio.maib@gmail.com](mailto:aurelio.maib@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

**MARTÍNEZ IBARRA AURELIO**  
Nombre y firma del alumno(a)



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
IPN.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Politécnico Nacional por haberme brindado las facilidades para la elaboración de mi tesis “Diseño de un panel modular biocompuesto con características de absorción acústica empleando como refuerzo fibras de Bagazo de Agave Angustifolia Haw y matriz polimérica”.

Al Dr. Rafael Alavéz Ramírez y al Dr. Fernando Chiñas Castillo, por el apoyo y el espacio para realizar mis estudios académicos y sus valiosas sugerencias para el enriquecimiento del contenido de este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca académica otorgada durante el período de estudios de maestría en el cuál realicé la presente tesis de investigación.

Se agradece también a la empresa Colectivo Bagatech SPR de RL de CV, por permitirnos usar sus instalaciones y maquinaria para poder llevar a cabo nuestro trabajo de investigación.

Al honorable comité tutorial y jurado integrado por: Dr. Rafael Alavéz Ramírez, Dr. Fernando Chiñas Castillo, Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Miguel Chávez Gutiérrez y Dr. Francisco Castellanos León por su apoyo, disponibilidad y actitud siempre crítica a este trabajo lo que contribuyó a mejorar significativamente esta investigación.

A mis amigos, colegas y compañeros de trabajo: Marco Antonio, Carlos, Andy, Luis Ángel, Raymundo, Agustín, Aida, Miguel, Margarito, Bernabé... a todas las personas que directa o indirectamente de alguna manera intervinieron y apoyaron en la realización de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo ofrezco especialmente a Dios, por concederme la vida y la dicha de permanecer en este mundo y crecer bajo su protección y cuidado.

A mis padres:

Adolfo R. Martínez y Luz María Ibarra

Por su gran amor, enseñanza de valores y principios.

A mis queridos hermanos:

Adolfo y Luz María

Por su apoyo incondicional

A la memoria de mis abuelos

Aurelio, María del Carmen, Adolfo y María Luisa

A toda mi familia y amigos.

## RESUMEN

En la presente investigación se desarrolló el diseño de un panel modular biocompuesto reforzado con fibras de *Agave Angustifolia* Haw a base de dos matrices, una sintética y una natural, con la finalidad de evaluar su coeficiente de absorción acústica. En la primera fase del estudio se desarrolló un método de obtención y acondicionamiento de fibra cocida de agave y se obtuvieron las densidades aparentes de tres longitudes de fibra, de 10, 25 y 50 mm. Con base a los resultados, se seleccionó la fibra de agave corta (FC) para continuar la investigación en fases posteriores. Se elaboraron paneles compactados de 60 cm de ancho \* 60 cm de largo \* 2.5 cm de espesor con la relación matriz vs refuerzo de 2:1 y con un tiempo de curado de 28 días bajo condiciones ambientales.

Para la evaluación acústica, se llevaron a cabo pruebas de absorción acústica a escala real por el método de Cámara Reverberante en base a la norma ASTM C423-17, los valores obtenidos muestran que el panel biocompuesto con la matriz de hule natural (HU) obtuvo un valor de coeficiente de reducción de ruido (NRC) igual a 0.45, superando el obtenido para el panel biocompuesto con la matriz comercial de urea formaldehído (UF).

Para la evaluación física de los paneles se llevaron a cabo pruebas de incendio en base a la norma ASTM D635-03 y pruebas de absorción de agua e hinchamiento por inmersión en base la norma ASTM D1037-12.

## ABSTRACT

In the present research the design of a bio composite modular panel reinforced with *Agave Angustifolia* Haw fibers based on two matrices, one synthetic and one natural, was developed in order to evaluate its acoustic absorption coefficient. In the first phase of the study, a method of obtaining and conditioning agave fiber was developed and the apparent densities of three fiber lengths of 10, 25 and 50 mm were obtained. Based on the results, the short agave (FC) fiber was selected to continue the research in later phases. Compacted panels 60 cm wide \* 60 cm long \* 2.5 cm thick were produced with the matrix vs. reinforcement ratio of 2:1 and with a curing time of 28 days under ambient conditions.

For acoustic evaluation, real-scale acoustic absorption tests were carried out by the Reverberating Chamber method based on ASTM C423-17, the values obtained show that the bio composite panel with the natural rubber matrix (HU) obtained a noise reduction coefficient (NRC) value equal to 0.45, exceeding that obtained for the bio composite panel with the commercial matrix of urea formaldehyde (UF).

For the physical evaluation of the panels, fire tests were carried out based on ASTM D635-03 and water absorption and swell immersion tests based on ASTM D1037-12.

# ÍNDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS .....	x
INDICE DE TABLAS .....	xiii
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	15
1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.2 Justificación .....	18
1.3 Revisión del estado de arte .....	20
1.4 Objetivo general .....	23
1.5 Objetivos específicos .....	23
1.6 Hipótesis .....	23
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	24
2.1 Materiales Compuestos .....	24
2.1.1 Clasificación .....	24
2.1.2. Propiedades Generales .....	25
2.2 Fibras.....	26
2.2.1. Fibras naturales .....	27
2.2.2. Clasificación.....	27
2.2.3. Características .....	28
2.3. Matrices.....	29
2.3.1. Matrices plásticas.....	29
2.3.2. Matrices Naturales.....	31
2.3.2.1. Hule Natural .....	32
2.4. Acústica.....	33
2.4.1. Clasificación del sonido .....	33
2.4.2. Características de los sonidos musicales .....	34
2.4.2.1. Frecuencia o tono.....	34



2.4.2.2. Intensidad .....	35
2.4.2.3. Timbre .....	35
2.4.3. Propagación del sonido .....	35
2.4.4. Absorción acústica .....	36
2.4.5. Medición de la absorción sonora de una sala .....	37
2.4.6. Cámara de reverberación.....	38
2.4.7. Coeficiente de reducción de ruido (NRC).....	38
3. METODOLOGIA.....	39
3.1 Diagrama de flujo de las fases del proyecto.....	39
3.2. Fase I – Determinar densidades y pesos específicos de las fibras de agave.....	40
3.2.1. Diagrama de flujo .....	40
3.2.2. Obtención de las fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw.....	43
3.2.2.1. Colecta.....	43
3.2.2.2. Cuarteo .....	42
3.2.3. Acondicionamiento de la fibra. ....	43
3.2.3.1. Secado .....	43
3.2.3.2. Selección de Fibras .....	43
3.2.3.3. Molienda.....	44
3.2.3.4. Tamizado .....	45
3.2.3.5. Mercerizado.....	47
3.2.4. Obtención de las densidades fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw .....	48
3.3. Fase 2 - Elaborar y seleccionar la mezcla óptima del panel modular biocompuesto para la construcción de paneles modulares. ....	49
3.3.1. Diagrama de flujo .....	49
3.3.2. Materiales.....	49
3.3.2.1. Fibras de bagazo cocido de Agave angustifolia Haw .....	49
3.3.2.2. Matriz Polimérica .....	50

3.3.3. Mezclado .....	51
3.3.4. Vaciado por gravedad.....	52
3.3.5. Moldeado .....	53
3.3.6. Curado .....	53
3.4. Fase 3 - Evaluar el coeficiente de absorción acústica del panel modular.....	54
3.4.1. Diagrama de flujo.....	54
3.4.2. Descripción cámara reverberante .....	54
3.4.3. Medición de tiempo de reverberación y área de absorción sonora de cámara reverberante vacía .....	55
3.4.4. Colocación muestras en cámara reverberante. ....	57
3.4.5. Medición de tiempo de reverberación y área de absorción sonora de cámara reverberante con la muestra. ....	57
3.5. Fase IV – Evaluar el panel modular biocompuesto en términos físicos.....	60
3.5.1. Diagrama de flujo.....	60
3.5.2. Absorción de agua e hinchamiento por inmersión .....	62
3.5.2.1. Diseño de Experimento .....	63
3.5.2.2. Procedimiento.....	63
3.5.2.3. Calcular el contenido de humedad e hinchamiento .....	64
3.5.3. Prueba de incendio o fuego .....	65
3.5.3.1. Diseño de Experimento .....	65
3.5.3.2. Procedimiento.....	65
3.5.3.3. Calcular la velocidad lineal relativa de combustión.....	67
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>68</b>
4.1 Resultados de la Fase I.....	68
4.2 Resultados de la Fase II.....	70
4.3 Resultados de la Fase III.....	73
4.4 Resultados de la Fase IV .....	80

5. CONCLUSIONES.....	85
6. RECOMENDACIONES .....	86
7. REFERENCIAS .....	87

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagrama de flujo de las fases del proyecto.....	40
Figura 3.2 Diagrama de flujo de la primer fase .....	41
Figura 3.3. Bagazo cocido de Agave angustifolia Haw .....	41
Figura 3.4. Montón de fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw .....	42
Figura 3.5. Norma de muestreo y cuarteo NMX-AA-015-1985 .....	42
Figura 3.6. Bagazo extendido de Agave angustifolia Haw .....	43
Figura 3.7. Selección de fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw.....	44
Figura 3.8. Fibra Seleccionada .....	44
Figura 3.9. Desperdicio de Fibra .....	44
Figura 3.10. Molino de Cuchillas.....	45
Figura.3.11.Tamizadora de fibras vegetales .....	46
Figura 3.12. Tratamiento alcalino .....	47
Figura. 3.13. Secado fibra tratada.....	47
Figura 3.14. Diagrama de flujo de la Fase II. ....	49
Figura 3.15. Taladro de Columna.....	51
Figura 3.16. Mezclado .....	51
Figura 3.17 Molde en MDF de 12 mm.....	52
Figura 3.18 Vaciado en molde de MDF .....	52
Figura 3.19 Moldeado en molde de MDF .....	53
Figura 3.20 Compresión manual. ....	<b>53</b>
Figura 3.21. Curado de paneles 28 días.....	53
Figura 3.22. Diagrama del procedimiento para la obtención del coeficiente de absorción acústica por el método: cámara reverberante .....	54
Figura 3.23. Cámara Reverberante CCADET-UNAM .....	55
Figura 3.24. Diagrama para la medición del tiempo de reverberación de la cámara vacía. .	56
Figura 3.25. Sistema de montaje especial de las muestras .....	57

Figura.3.26 .Montaje de la muestra en el bastidor dentro de la Cámara Reverberante.....	58
Figura 3.27. Diagrama de la fase IV.....	60
Figura 3.28. Muestras resina UF. ....	61
Figura 3.29. Muestras hule natural. ....	61
Figura 3.30. Muestras hule natural. ....	63
Figura 3.31. Muestras resina UF. ....	63
Figura 3.32. Modelo de prueba, vista frontal. ....	64
Figura 3.33. Modelo de prueba, vista lateral. ....	64
Figura 3.34. Colocación muestra hule natural.....	65
Figura 3.35. Colocación muestra resina UF. ....	65
Figura 4.1. Fibra corta 10- 12 mm.....	66
Figura 4.2. Fibra mediana 23- 25 mm. ....	66
Figura 4.3 Fibra larga 50 mm. ....	66
Figura 4.4. Medición fibra corta.....	66
Figura. 4.5. Medición fibra mediana. ....	66
Figura 4.6. Medición fibra larga.....	66
Figura 4.7. MEB fibra sola a 33X.....	67
Figura 4.8. MEB fibra sola a 80X ....	67
Figura 4.9. MEB fibra sola a 350X ....	68
Figura 4.10. MEB fibra sola a 550X ....	68
Figura 4.11. Cubos de fibra de agave de UF ....	69
Figura 4.12. Cubos de fibra de agave de HU.....	69
Figura 4.13 Compuesto HU X-22 ....	70
Figura 4.14. Corte transversal HU X-22. ....	70
Figura 4.15. Compuesto UF X-22. ....	70
Figura 4.16. Corte transversal UF X-23. ....	70
Figura 4.17. Tiempos de reverberación en la Cámara Reverberante con las muestra de resina urea formaldehido (M), con el bastidor (B) y con la cámara vacía (C).....	72
Figura 4.18. Tiempos de reverberación en la Cámara Reverberante con las muestras de hule natural (HU) y con la cámara vacía (C).....	74

Figura 4.19 Tiempos de reverberación en la Cámara Reverberante con las muestras de urea formaldehído (UF) y con hule natural (HU).....	74
Figura 4.20. Medición del coeficiente de absorción por tercios de octava de los paneles bajo la norma ASTM C 423, en la condición de Cámara Reverberante con el bastidor.....	76
Figura 4.21. Medición del coeficiente de absorción por tercios de octava de los paneles bajo la norma ASTM C 423, en la condición de Cámara Reverberante .....	77
Figura 4.22. Medición del coeficiente de absorción por tercios de octava de los paneles bajo la norma ASTM C 423, en la condición de Cámara Reverberante. ....	78
Figura 4.23. Muestra UF1. ....	81
Figura 4.24. Muestra UF10. ....	81
Figura 4.25. Muestras de resina de urea formaldehído quemadas.....	82
Figura 4.26. Muestra HU1.....	83
Figura 4.27. Muestra HU2.....	83
Figura 4.28. Muestra HU3.....	83
Figura 4.29. Muestras de resina de hule natural quemadas. ....	83

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de las fibras naturales .....	28
Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de matrices comunes .....	30
Tabla 2.3. Temperaturas de uso de matrices .....	30
Tabla 2.4. Especificaciones de hule de caucho natural .....	32
Tabla 3.1. Tamices utilizados y obtención de partículas obtenidas .....	46
Tabla 3.2 Especificaciones de Resina Urea Formaldehido .....	50
Tabla 4.1 Densidad Aparente de las fibras de Agave.....	67
Tabla 4.2 Tabla de mezclas Refuerzo vs Matriz .....	68
Tabla 4.3. Tiempo de reverberación e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava.....	69
Tabla 4.4. Tiempo de reverberación e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava.....	73
Tabla 4.5.- Coeficientes de absorción e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava. ..	75
Tabla 4.6.- Coeficientes de absorción e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava. ....	77
Tabla 4.7 Propiedades acústicas de materiales naturales y reciclados no convencionales por el método de cámara reverberante.....	79
Tabla 4.8 Propiedades acústicas de materiales comerciales.....	79
Tabla 4.9- Datos de absorción de agua e hinchamiento por inmersión.....	80
Tabla 4.10- Datos de absorción de agua e hinchamiento por inmersión.....	81
Tabla 4.11. Velocidad Lineal de Combustión Muestra Resina UF.....	82
Tabla 4.12. Velocidad Lineal de Combustión Muestra Hule Natural .....	84

## **1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Uno de los retos más importantes de la industria de la construcción en edificios y viviendas es la reducción en el consumo de energía en todas sus fases de vida, desde la construcción hasta la demolición. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente estima que los edificios consumen alrededor del 40% de la energía global del mundo, el 25% del agua mundial, el 40% de los recursos mundiales; los edificios también son responsables de alrededor de 1/3 de las emisiones de gases de efecto invernadero de todo el planeta. La preocupación ecológica ha dado lugar a un interés renovado en materiales poliméricos naturales. Las propiedades de los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra natural depende de varios factores, como es su composición química, dimensiones de la celda, ángulo micro fibrilar, defectos, estructura, propiedades físicas y propiedades mecánicas, así como la interacción de una fibra con el polímero. Con el fin de ampliar el uso de fibras naturales para materiales compuestos y la mejora de sus propiedades, es imprescindible conocer las características de la fibra.

El presente trabajo da una propuesta a los problemas presentados por el uso de materiales y paneles con propiedades de aislamiento acústico, pre-fabricados usados en la industria de la construcción tales como maderas, tabla roca, panel w, yeso, durock, entre otros, dicha propuesta se basa en el uso de la fibra de agave y otros componentes químicos biodegradables.



## **1.1 Planteamiento del problema**

El ruido es considerado uno de los contaminantes más grandes del mundo (Berglund et, al. 1995). En la década de los 90's, la Organización Mundial de la Salud (OMS) proporcionó datos alarmantes sobre este tipo de contaminación en los Estados Unidos, alrededor del 40% de la población estaba expuesta al ruido del tráfico con un nivel de presión sonora superior a 55 dB(A) durante el día y el 20% estaban expuestos a niveles superiores a 65 dB(A). Durante la noche, más del 30% de la población fueron expuestos a niveles de presión sonora que exceden los 55 dB(A), lo que ocasiona una perturbación del sueño.

Los efectos sobre la salud debido a la exposición al ruido son bien conocidos, la mayoría de los efectos sobre la salud son de tipo sensorial como el estrés, presión arterial alta, interferencia del habla, pérdida de audición, interrupción del sueño y pérdida de productividad. (Passchier, 2000).

El aislamiento acústico es una de las técnicas utilizadas en la construcción para reducir los efectos del ruido en la salud humana, sin embargo, el problema no está completamente resuelto y es necesario realizar más investigación para encontrar nuevos materiales capaces de mejorar el rendimiento de las soluciones convencionales.

La construcción ha sido acusado de causar problemas ambientales que van desde un consumo excesivo de los recursos mundiales no renovables, tanto en términos de operación y ejecución, hasta la contaminación del medio circundante. La investigación sobre diseño de edificios verdes y el uso de materiales de construcción sustentables para minimizar el impacto ambiental ya está en marcha. Sin embargo, basándose en el diseño de un proyecto para lograr el objetivo del desarrollo sostenible, o para minimizar los impactos a través de una adecuada gestión en el lugar, no es suficiente para manejar el problema actual. El objetivo para la evaluación de la sostenibilidad va más allá que en la etapa de diseño de un proyecto para considerar su importancia en una etapa temprana, antes de que cualquier diseño detallado o incluso antes de que se asumió el compromiso de seguir adelante con un desarrollo. Sin embargo, poco o nada de preocupación se ha dado a la importancia de la selección de los diseños más respetuosos con el medio ambiente durante la etapa de evaluación del proyecto; la etapa en materia de medio ambiente se incorporan mejor (Grace, 2008).

El desarrollo tecnológico relacionado con las demandas y expectativas de los consumidores sigue aumentando la demanda de recursos globales, que conlleva a problemas de la disponibilidad de material y la sostenibilidad ambiental. La introducción del concepto “sostenibilidad” en el sector de la construcción, ha llevado gradualmente a la producción de materiales absorbentes hechos de materiales naturales o reciclados (Asdrubali, D’Alessandro et al. 2015), algunos presentes ya en el mercado y otros en etapas tempranas de investigación o producción. Estos materiales se han convertido más y más eficientes, con nuevas composiciones y sus procesos se han investigado intensamente, desarrollado y aplicado en consecuencia. La crisis del petróleo hizo que los biocompuestos tomaran un significado importante y se han convertido en materiales de ingeniería con una muy amplia gama de propiedades (Faruk et al., 2000-2010).

El bagazo es un residuo fibrovascular que se obtiene de la destilación de jugos fermentados de las pencas de agave, el cual está compuesto por fibras, medula y residuos líquidos cuya calidad no permite su reincorporación al proceso de mezcal, por lo que es acumulado gradualmente en las mezcaleras y posteriormente es enviado a los campos de cultivo donde se abandonan grandes volúmenes debido a la falta de espacios y procedimientos para confinar y tratarlo. Una menor cantidad es utilizada en las comunidades aledañas como combustible doméstico para la cocción de alimentos, forraje para animales, entre otros usos. (Baena-González, 2005, p2.).

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el 2015 el estado de Oaxaca contaba con 7,748.26 hectáreas de agave mezcalero sembradas, de la cual la superficie cosechada fue de 1,199 hectáreas, equivalentes a 72,704.67 toneladas de agave. Con el volumen cosechado se desecharon 17,277.59 toneladas de bagazo, es decir, por hectárea cosechada se obtienen 14.41 ton de bagazo.

La demanda de tableros de fibra de densidad media y alta densidad (MDF y HDF) está aumentando en muchas regiones del mundo (El-Kassas y Mourad, 2013). Fibras de madera refinadas son comúnmente empleadas como materia prima para la producción de estos paneles. Sin embargo, la falta de material de madera en bruto, especialmente en países con deficiencia de madera, ha animado a las investigaciones sobre el uso de fibras vegetales para producir paneles compuestos no estructurales (Aisyah et al., 2013; Biswas et al., 2011; Fiorelli et al., 2012; Grigoriou et al., 2000; Halvarsson et al., 2008, 2009; Okuda y Sato,

2004; Paridah et al., 2009). Además, los investigadores también han combinado la biomasa de residuos con fibras de madera para la fabricación de paneles compuestos (Abdul Khalil et al., 2010; Nourbakhsh et al., 2010).

Es por eso que el propósito de la investigación será, desarrollar un panel modular biocompuesto sustentable, usando como matriz resinas biodegradables. Ya que en un futuro estas fibras proporcionarán un importante impacto económico con grandes posibilidades de desarrollo.

### **1.1. Justificación**

Existe preocupación acerca de cómo mejorar las prácticas de construcción con el fin de minimizar su efecto perjudicial sobre el medio ambiente (Cole, 1999; Holmes y Hudson, 2000). El impacto ambiental de la construcción, los edificios verdes y el diseño para el reciclaje de los materiales de construcción han capturado la atención de los profesionales de la construcción en todo el mundo (Johnson, 1993; Cole, 1998; Crawley y Aho, 1999; Rees, 1999). El rendimiento en la construcción es ahora una de las principales preocupaciones de los profesionales del sector (Crawley y Aho, 1999) y la evaluación de los edificios en su desempeño ambiental se ha convertido en uno de los principales problemas en la construcción sostenible (Cole, 1998; Cooper, 1999; Holmes y Hudson, 2000).

Según Cole (1998), la definición de rendimiento de la construcción varía en función de los diferentes intereses de las partes involucradas en la construcción del desarrollo. Por ejemplo, el propietario de un edificio puede desear que su edificio se evalúe desde un punto de vista financiero, mientras que los ocupantes pueden estar más preocupados por la calidad del aire en el interior, la comodidad, la salud y la seguridad. El uso de un solo método para evaluar el desempeño ambiental de un edificio y satisfacer todas las necesidades de los usuarios no es tarea fácil. Por lo tanto, una evaluación de construcción ideal ambiental debe de incluir todos los requisitos de las diferentes partes involucradas en el desarrollo. La evaluación del desempeño ambiental de edificios incluye tanto los criterios cuantitativos y cualitativos de rendimiento. Los criterios cuantitativos comprenden el uso anual de energía, consumo de agua, las emisiones de gases de efecto invernadero, etc., mientras que los criterios cualitativos incluyen impacto en el valor ecológico del lugar, el impacto en los patrones de viento locales (Grace, 2008).

La sostenibilidad, definida por Young (1997), es una medida de qué tan bien las personas están viviendo en armonía con el medio ambiente, teniendo en cuenta el bienestar de las personas con respecto a las necesidades de las generaciones futuras y para la conservación del medio ambiente. Young (1997) describe la sostenibilidad como un “taburete de tres patas”, cada una de las patas representando: el ecosistema, la economía y la sociedad. Cualquier pata que faltante en el “taburete de la sostenibilidad” causará inestabilidad porque la sociedad, la economía y el ecosistema están íntimamente ligados entre sí. De hecho, Young (1997) explica claramente que una medida de la sostenibilidad debe combinar las acciones individuales y colectivas para mantener el medio ambiente, así como mejorar la economía y satisfacer las necesidades sociales.

Para que el ambiente de trabajo de los edificios verdes pueda ser más cómodo y satisfactorio que los edificios convencionales debe haber algunas características únicas al diseño, que podrían contribuir a una mejor calidad ambiental en interiores. Además, debe haber un vínculo entre la comodidad y la satisfacción. Algunas de las características que se relacionan con la calidad ambiental en interiores de un edificio debe incluir la ventilación natural y el uso de acabados de baja toxicidad y muebles (que resulta en una mejor calidad del aire), la iluminación natural para una mejor calidad de iluminación, ventanas funcionales y ventiladores que permiten al personal tener el control sobre las condiciones ambientales y su acceso a los sonidos del exterior, así como la utilización de materiales reciclados que podrían ser considerados para proporcionar un interior más sereno y estéticamente agradable (Heerwagen, 2005). Browning y Romm (1995) en su estudio, reportan estudios de pre-post observación donde examinaron el efecto de los diseños de eficiencia energética en la productividad de los trabajadores. El estudio incluyó una adaptación eficiente de la energía a la Oficina Principal de Correos en Reno, Nevada. Un nuevo techo se monta en el edificio para mejorar la iluminación, la temperatura, y el ruido dentro de la sala de correo de clasificación. La productividad que se reporta habría aumentado en un 8.6% después de la modificación. Menzies et al., (1997) en su estudio concluyó que la productividad alcanzó un 11% más alto para los trabajadores que recibieron control sobre la cantidad y dirección del flujo de aire en sus estaciones de trabajo. Brager y de Dear (1998) reportaron una relación entre el control personal de las condiciones ambientales, especialmente temperatura, ventilación, y desempeño de trabajo. Sin embargo, Heerwagen (2005), también señala un

estudio realizado por Preller et al., (1990) indica el ausentismo asociado con el Síndrome del Edificio Enfermo (SBS) el cual consiste en el conjunto de síntomas o molestias originadas por la contaminación del aire en espacios cerrados, podría ser 34% menor si los empleados se les da el control de la temperatura y la ventilación.

## **1.2. Antecedentes**

Las fibras naturales son ligeras, renovables, de bajo costo y de alta resistencia específica. Esta excelente relación calidad-precio en combinación con el carácter amigable con el medio ambiente es muy importante para la aceptación de las fibras naturales en los grandes mercados de ingeniería tales como la industria automotriz (Wittig, 1994) aeronáutica y de construcción. Sin embargo, las fibras naturales presentan algunas desventajas: alta absorción de humedad, mala estabilidad dimensional, baja resistencia térmica, resistencia de la fibra aniso trópica y variabilidad (Stamboulis y Baillie, 2000).

Durante la última década, las fibras naturales se han encontrado como un recurso potencial para la fabricación de materiales compuestos de bajo costo (Kuruvilla et al. 1995). Sin embargo, estos materiales compuestos a menudo presentan problemas de adhesión y compatibilidad de fibra-matriz, lo que se traduce en una disminución de las propiedades mecánicas. Por lo tanto, con el fin de mejorar la interacción entre la fibra y la matriz, es necesario realizar tratamientos para la modificación de la morfología de las fibras. Algunos investigadores han aplicado soluciones alcalinas (Rong-Zhang, 2001; Bledzki et al., 2004; Van de Weyenberg et al., 2005; Aziz et al., 2005) en compuestos de plásticos reforzados con fibra natural tal como polipropileno / lino, epoxi / lino, poliéster y / kenaf. Durante el tratamiento alcalino, la estructura física de las fibras cambia debido a la eliminación de materiales cerosos e impurezas. Esta acción a menudo conduce a la mejora de la unión interfacial entre las fibras y la matriz. Por lo tanto, ha habido un aumento en los estudios de fibra natural de integración global de compuestos verdes (Netravali-Chabba, 2003; Oksman et al., 2003; Lee-Wang, 2006; Mwaikambo-Ansell, 2003; Nishino et al., 2003).

En cuanto a los métodos de extracción preexistentes para la obtención de la fibra incluyen principalmente el método físico, el método químico y el método biológico. La literatura presenta los siguientes: extracción de ácidos (Walton et al., 2010; Wang et al., 2012);

extracción de agua caliente (Krogell et al., 2013; Liu, 2010; Liu et al., 2012); extracción de explosión de vapor (Martin-Sampedro et al., 2014); extracción alcalina (Sun et al., 2013) y extracción de explosión de vapor ácido (Sabiha-Hanim et al., 2015). La condición proceso de extracción de ácido diluido es difícil de controlar, y el rendimiento de fabricación de pasta se reduce por la hidrólisis de la celulosa. La estructura de la celulosa será interrumpida durante la extracción de explosión de vapor. El costo de operación de extracción alcalina es alto para el empleo de álcali y ácido añadido para ajustar el pH. La extracción mediante agua caliente se desarrolla con el propósito de reducir el costo y la contaminación ambiental, y la hidrólisis de los extractos de agua caliente se pueden combinar con la separación de materiales sólidos. Benko et al., (2007) encontró que el rendimiento de extracción de hemicelulosa (HEY) aumentó con el aumento de temperatura de extracción de agua caliente, pero el peso molecular de los polisacáridos se redujo, así como el daño de hemicelulosa aumentó.

En la ingeniería, el uso de materiales compuestos reforzados con fibras naturales es muy importante, teniendo en cuenta que estas fibras son menos riesgosas para la salud y la seguridad durante su manipulación. El conocimiento de sus atributos mecánicos a tensión ha potencializado su uso en diferentes aplicaciones industriales; al igual que sucede en México con las fibras obtenidas de residuos similares al bagazo del *Agave angustifolia* Haw como el rastrojo de la piña o el bagazo de la piña de Henequén, que son aprovechadas por sus cualidades mecánicas en la elaboración de tableros y materiales compuestos (Balam y Cocom et al., 2006).

Estudios recientes han llevado procesos de compresión y de moldeo por inyección con el fin de evaluar el mejor método de mezcla para fibras (bagazo de caña, bagazo de celulosa y bagazo bencilado) y matrices con polipropileno (PP) (Luz et al., 2007). El proceso de moldeo por inyección realizado bajo vacío demostró funcionar mejor. Compuestos se han obtenido con una distribución homogénea de fibras y sin ampollas. Aunque, los materiales compuestos no tienen una buena adhesión entre la fibra y la matriz de acuerdo a sus propiedades mecánicas.

El efecto de los componentes biológicos de bagazo de la configuración de materiales compuestos bagazo/cemento (Bilba et al., 2003) el diseño y optimización de polihidroxibutirato (PHB) /compuestos de fibra de bagazo (Hodzic et al., 2007), propiedades

tribológicas de materiales compuestos bagazo/poliéster (El-Tayeb, 2008) , propiedades de fluencia de fibra de bagazo reforzada con poli cloruro de vinilo (PVC) y compuestos polietileno de alta densidad (HDPE) (Xu et al, 2010), bagazo/compuestos HDPE para el blindaje de la radiación (El-Sayed, 2003), fibra de bagazo tratado con silano como refuerzo para compuestos cementantes (Bilba et al, 2008), la durabilidad del bagazo/compuestos PP expuestos a hongos arcoíris (Nadali et al, 2010), y el análisis del ciclo de diseño ecológico y la vida como estrategia para componentes de automóviles de bagazo/compuestos PP (Luz et al, 2010) han sido examinados.

### **1.3. Objetivo General**

Diseñar un panel modular biocompuesto desde el punto de vista acústico, reforzado con fibras de *Agave angustifolia* Haw para su uso en la industria de la construcción considerándose dicho compuesto como una alternativa viable para sustituir materiales convencionales.

### **1.4. Objetivos Específicos**

- Determinar densidades y pesos específicos de la fibra de Agave Angustifolia Haw a utilizar.
- Elaborar y seleccionar la mezcla óptima para la fabricación del panel modular biocompuesto.
- Evaluar el coeficiente de absorción acústica del panel biocompuesto.
- Evaluar el panel biocompuesto en términos físicos: incendio y absorción de agua.

### **1.5. Hipótesis**

Las fibras del *Agave angustifolia* Haw se pueden utilizar como agente de refuerzo en la fabricación de un material biocompuesto para mejorar las propiedades de absorción acústica, influenciadas por la variación de su longitud, densidad y relación matriz-refuerzo.



## 2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Materiales Compuestos

En ciencia de materiales, los materiales compuestos son aquellos que cumplen las siguientes propiedades:

- Están formados de dos o más componentes, distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí, y separadas por una interface.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes, sinergia.

Los materiales compuestos nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Aunque existe una gran variedad de materiales compuestos, en todos se pueden distinguir las partes de su estructura: agente reforzante y matriz. El agente reforzante es una fase de carácter discreto con geometría fundamental para definir las propiedades mecánicas del material. La matriz tiene carácter continuo y es responsable de las propiedades físicas y químicas. Transmite los esfuerzos al agente reforzante, también lo protege y da cohesión al material.

#### 2.1.1. Clasificación

De manera general, los materiales compuestos se dividen en tres categorías dependiendo de la forma de los materiales involucrados.

##### a) Materiales compuestos reforzados con partículas.

Están compuestos por partículas de un material duro y frágil dispersas discreta y uniformemente, rodeadas por una matriz más blanda y dúctil. Existen dos tipos: los endurecidos por dispersión y los formados por partículas verdaderas.

b) Materiales compuestos reforzados con fibras.

Estos compuestos consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez, y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El agente reforzante (fibra) proporciona al material su fuerza a tracción, mientras el otro componente (matriz) transfiere la carga a todas las fibras. También, a menos que la matriz elegida sea especialmente flexible, evita el pandeo de las fibras por compresión (Askeland, 1998).

c) Materiales compuestos reforzados laminares.

Están formados por varias capas o láminas unidas entre sí. El triplay es un material compuesto laminar, tiene varias capas unidas entre sí, resultando un material con mejores características con respecto a cada uno de sus componentes.

### **2.1.2. Propiedades Generales**

Las propiedades de un compuesto son el resultado de las propiedades de sus constituyentes, de su geometría y distribución de sus fases. Uno de los parámetros más relevantes es el volumen (o peso) de la fracción de refuerzo o la relación de volumen de las fibras. La distribución del refuerzo del sistema transmite sus características. La distribución del refuerzo transmite al sistema sus características. Entre menos uniforme sea el refuerzo, más heterogéneo es el material y mayor es la probabilidad de rotura en las porciones más débiles, mientras que la geometría y orientación del refuerzo tiene un impacto sobre la anisotropía del sistema. Las fases de los materiales compuestos desempeñan papeles diferentes y dependen de la tipología y la aplicación propia. En el caso de materiales compuestos de bajo o medio desempeño estructural, el fortalecimiento se hace generalmente de fibras cortas o partículas, que permiten una cierta rigidez y, al mismo tiempo, refuerzan el material sólo a nivel local. Por otro lado, la matriz es el miembro principal responsable de soportar la carga y para definir las características mecánicas del material.

En el caso de los materiales compuestos de alto rendimiento estructural, normalmente se hacen de fibras continuas que construyen el armazón del material y transmiten su rigidez y resistencia en dirección de la fibra.

La fase de la matriz transporta la protección, el soporte para las fibras y la transferencia de las cepas locales de una fibra a la otra. La interface, aunque pequeña en dimensión, puede desempeñar un papel muy importante en el control de los mecanismos de falla, la resistencia a la tracción y, sobre todo, el comportamiento de deformaciones / tensiones del material.

## **2.2. Fibras**

Como ya se ha mencionado, debido a sus dimensiones limitadas, las fibras muestran una perfección estructural sobresaliente; esta característica, junto con las propiedades inherentes de los materiales constituyentes, transmite:

- Alta tensión de rotura
- Módulo de tracción muy alto
- Peso específico muy bajo
- Comportamiento elástico lineal hasta la rotura

Las fibras más populares utilizadas en los materiales compuestos son: de vidrio, de carbono, las fibras orgánicas y las minerales. Pueden ser de materiales compuestos o de fibras continuas paralelas en un plano, o también de hilos cortados con orientación aleatoria sobre una superficie o, finalmente, pueden ser tejidos de acuerdo con una configuración de trama y aplicados sobre una superficie.

### **2.2.1. Fibras naturales**

Como fibras naturales, se entienden los materiales fibrosos que pueden extraerse de la naturaleza, principalmente constituidos por celulosa y lignina, además de otros componentes en menor cantidad como: hemicelulosa y ceniza, por esta razón las fibras naturales también reciben el nombre de fibras lignocelulósicas. Estas fibras se han empleado como alimento, vestimenta, material de construcción, en la fabricación de utensilios, desarrollo de herramientas y muchos otros usos (Rowell, 1997).

Pueden clasificarse según su origen: fibras vegetales (algodón, lino, yute, cáñamo, sisal), fibras animales (lana, seda), fibras minerales (asbestos) o sintéticas (Narendra y Yang, 2005). Las fibras utilizadas para obtener compuestos naturales consisten en partículas macroscópicas (en el orden de milímetros) y se obtienen mediante tecnologías tales como el aplastamiento del material seleccionado de filamentos, o hilos muy largos (del orden de metros) obtenidos de las hojas bastante fuertes y gruesas de algunas plantas que viven en las regiones tropicales del mundo. Existe una tercera posibilidad de obtener fibras, recurriendo a tratamientos químicos más o menos severos de la matriz vegetal a partir de la cual se van a extraer. Las fibras naturales más utilizadas son: Fibras de cáñamo, de lino, de algodón y de agave.

### **2.2.2. Clasificación**

Las fibras, se clasifican en función de su estructura química y de su origen. Por su origen las fibras naturales se dividen en cuatro grupos. Fibras vegetales, fibras de animales o de proteínas, fibras minerales y aquellas que son obtenidas de residuos agrícolas de plantas anuales o bien de plantas arbóreas madereras (Bodros y Baley, 2008). Las fibras vegetales de mayor utilidad pueden clasificarse tomando en consideración su origen anatómico, su tipificación botánica y sus usos. Hay aquellas que son obtenidas de hojas, raíces, frutos, tallos y semillas. Los residuos agrícolas son las partes de las plantas que se quedan en el campo después de cosechar el cultivo principal son una fuente importante de fibras residuales por ser anualmente renovables, abundantemente disponibles y de valor limitado (Saheb y Jog, 1999).

La optimización de los recursos lleva al uso de materiales naturales, tal es el caso del mundo vegetal, donde las células, individuales o en grupos, están diseñados a tensión y rigidez. Constituidos principalmente de celulosa, un polímero natural con alta resistencia y rigidez por unidad de peso, y material de construcción de las células fibrosas en las plantas. Dando pauta a investigaciones que propongan aplicaciones más técnicas, como es el desarrollo de nuevos materiales. Estas fibras son utilizadas en la elaboración de materiales compuestos debido a su bajo costo, baja densidad y alta resistencia. Proveen rigidez y resistencia, son fáciles de reciclar y a diferencia de otras fibras, como la fibra de vidrio, no son quebradizas. Los compuestos son usados para elaborar partes de automóviles, muebles, aislantes térmicos y paneles prefabricados para el ramo de la construcción (Narendra y Yang, 2005).

Dentro de este tipo de fibras se encuentra la fibra del bagazo cocido de agave, la cual no tiene un uso específico. De manera muy escasa se ha utilizado para la elaboración de sogas, para la confección de algunas artesanías, para la nutrición de suelos como composta, para macetas en malla, para relleno de colchones, asientos, y como sustrato para plántulas; sin embargo, estas fibras lignocelulosas son de abundante disposición, anualmente renovables y de valor limitado.

### 2.2.3. Características

En la tabla 2.1 se muestran algunas características de las fibras naturales que son más usadas para reforzar materiales compuestos (Brigante, 2014).

**Tabla 2.1 Características de las fibras naturales**

	Elementary fibers		Industrial fibers			
	Length (mm)	Diameter ( $\mu$ )	Length (mm)	Thinness (mg)	Stiffness	Breaking length (km)
Hemp	28.0	20	1.0–2.2	200–250	1.4	35–65
Kenaf	8.0	18	1.2–1.8	100–300	1.8	30–35
Urena	7.0	20	1.2–1.8	250–300	1.7	35–40
Jute	1.6–2.0	18	1.5–3.0	250–300	1.5–1.7	30–40
Ramie	160.0	40–55	0.2–0.4	2,000–2,500	1.4	55–60
Sisal	2.0–4.0	20–30	0.5–1.0	30–35	2.3	45–55
Formier	4.0–8.0	8–13	1.2–2.5	100–150	–	35–45

## **2.3. Matrices**

Las fibras no serían tan relevantes, a pesar de sus fuertes valores de tensión y elasticidad, sin una estructura estable del material a diseñar. Esta tarea es realizada por la matriz, que incorpora las fibras y asegura que se dé una estructura al material, y, al mismo tiempo, protege las fibras del entorno externo. Las matrices se pueden distinguir en matrices de plástico, metal y cerámicas.

### **2.3.1. Matrices plásticas.**

Una matriz de plástico puede estar compuesta de una resina termoestable o termoplástica. Las resinas termoestables muestran una estructura que, al aumentar la temperatura más allá de un límite específico, se degradan de forma irreversible, es decir, después de la polimerización, no pueden volver a un estado líquido, mientras que las resinas termoplásticas se vuelven más líquidas con temperaturas crecientes, pero una vez que enfriadas, recuperan sus propiedades y, por lo tanto, ofrecen la ventaja de volver a ser estructuradas, incluso después de la polimerización. Esta diferencia de comportamiento se debe a la estructura de las moléculas poliméricas, a la distribución espacial de los diferentes tipos de módulos y al grado de cristalinidad. Las aplicaciones termoplásticas se ven obstaculizadas por las bajas temperaturas de funcionamiento, por lo que se utilizan para producir geometrías aún más complejas de una manera fácil y rápida, mientras que las resinas termoestables se pueden aplicar bajo una amplia gama de temperaturas. Las matrices plásticas (resinas) más importantes son poliéster, epoxi, fenólica y silicona.

Las matrices termoplásticas habitualmente empleadas en el campo de materiales compuestos aparecen, antes de la aplicación, en un estado líquido más o menos viscoso. En esta etapa, todavía no se han sometido a reticulación y, para activar este proceso, se añaden agentes específicos al polímero, también conocidos como catalizadores en el caso de matrices de poliéster, y endurecedores de otro modo. El tiempo requerido para la reticulación se puede ajustar añadiendo aceleradores o inhibidores. Incluso con el mismo tipo de compuesto, el tiempo de reticulación está fuertemente influenciado por la temperatura, el cual disminuye a medida que aumenta la temperatura.

El tipo de matriz elegido no afecta en gran medida las propiedades mecánicas y estáticas de los compuestos en dirección a las fibras. Sin embargo, la matriz es el componente que está en contacto directo con el entorno en el que actúa el material compuesto, transmitiéndolo así: Resistencia a la corrosión, resistencia al calor y resistencia a la abrasión.

Para todas las aplicaciones donde estas propiedades son requeridas, la elección del tipo adecuado de resina adquiere una relevancia especial. Las principales propiedades de las matrices termoestables se muestran en las Tablas 2.2 y 2.3. (Brigante, 2014).

**Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de matrices comunes**

Resin	Type	Density $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength $\sigma_r$ (N/mm <sup>2</sup> )
Epoxy	Thermosetting	1.1–1.4	2,100–5,500	40–85
Phenol formaldehyde	Thermosetting	1.2–1.4	2,700–4,100	35–60
Polyester	Thermosetting	1.1–1.4	1,300–4,100	40–85
Acetal	Thermoplastic	1.4	3,500	70
Nylon	Thermoplastic	1.1	1,300–3,500	55–90
Polycarbonate	Thermoplastic	1.2	2,100–3,500	55–70
Polyethylene	Thermoplastic	0.9–1.0	700–1,400	20–35
Polyester	Thermoplastic	1.3–1.4	2,100–2,800	55–60

**Tabla 2.3 Temperaturas de uso de matrices**

Thermosetting	°C	Thermoplastic	°C
Polyester	95	Nylon 66	140
Vinyl esters	95	Polyurethanes	180
Epoxy	175	Polysulfones	150
Polyamides	315	Polyamide—imides	240

### **2.3.2. Matrices Naturales.**

Los polímeros son compuestos moleculares de cadena larga, resultado de la unión de moléculas simples (monómeros) mediante una reacción química denominada polimerización. Su composición química es a base de C, H y O principalmente, en algunas ocasiones pueden presentar F, N, P, S y Si, entre otros. El C forma la columna vertebral de la mayoría de las cadenas. El número de monómeros en una cadena se denomina grado de polimerización y puede variar desde 100 hasta 100,000. La polimerización puede realizarse de manera natural, mediante reacciones bioquímicas en el interior de células, dando origen a polímeros naturales como las proteínas y el hule natural, o bien de manera artificial obteniéndose materiales plásticos. La manera aleatoria en que se produce la reacción de polimerización artificial, genera cadenas de diferentes tamaños que pueden ramificarse. Estas macromoléculas pueden presentar muchas configuraciones y conformaciones. La configuración se refiere a diferencias estructurales de corto alcance y no se puede modificar de manera reversible. La conformación se define como el acomodo en el espacio de los monómeros de una cadena, este arreglo si puede modificarse de manera reversible debido a la libertad de rotación de los enlaces (Reyes e Hinojosa, 2000). Los polímeros naturales incluyen al ácido ribonucleico (ARN) y al ácido desoxirribonucleico (ADN), vitales en los procesos de la vida. Por ejemplo, el ARN mensajero hace posible la existencia de las proteínas, los péptidos y las enzimas. Las enzimas colaboran en la química interior de los organismos vivientes y los péptidos conforman algunos componentes estructurales de la piel, el cabello y muchos más elementos. Otros polímeros naturales son los polisacáridos (azúcares) y los polipéptidos como la seda, la queratina y el cabello. El caucho natural es otro polímero natural, constituido por carbono e hidrógeno.



### 2.3.2.1. Hule Natural

El cultivo del hule (*Hevea brasiliensis*) por las necesidades agroecológicas está ubicado geográficamente en los estados del sureste mexicano, específicamente en Veracruz, Oaxaca, Chiapas y Tabasco, cuyas condiciones climáticas corresponden con altas precipitaciones, suelos drenados y fisiografía de lomeríos suaves. Su importancia a nivel nacional radica en el número de familias que dependen económicamente de los ingresos de este cultivo, así como por otros beneficios intangibles como la generación de servicios ambientales por fijación de carbono, captación de agua y protección del suelo (Comité Estatal del Sistema Producto Hule de Oaxaca, 2009). Los municipios con cultivo de hule en Oaxaca se caracterizan por tener clima cálido-húmedo y cálido-subhúmedo, distribuidos en las regiones: Istmo, Sierra Norte y Papaloapan. Es un producto especialmente útil por sus cualidades físicas (Comité Estatal del Sistema Producto Hule de Oaxaca, 2009): retiene el aire, es repelente al agua, no conduce fácilmente la electricidad y tiene larga duración. Se obtiene del árbol “El *Hevea brasiliensis*” pertenece a la familia Euforbiaceae, género *Hevea* y especie *brasiliensis* (SAGARPA et al. 2005). En la tabla 2.4 se muestran las especificaciones del hule de caucho natural.

**Tabla 2.4. Especificaciones de hule de caucho natural**

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Contenido de sólidos	61.5 %
Contenido en caucho	60.0 %
Sólidos en caucho	8.7 %
Contenido de amoniacó	8 ppm
Contenido de cobre	8 ppm
pH	10.4-11.2
Viscosidad brookfield	120 – 400 cps
Estabilidad mecánica	650s (min)

Fuente: Feliú (1996).

## 2.4. Acústica

La acústica es una rama de la física que tiene que ver con el diseño, generación, detección y propagación de las ondas sonoras. Tiene amplias aplicaciones en varios campos, algunas de las aplicaciones importantes en ingeniería son: diseño de instrumentos musicales, electroacústica, acústica arquitectónica y acústica musical.

### 2.4.1. Clasificación del sonido

Las ondas sonoras se clasifican en:

- a) Infrasonido
- b) Sonido audible
- c) Ultrasonido

Las ondas sonoras que tienen una frecuencia menor a 20 Hz se llaman ondas infrasonoras. Las ondas sonoras que tienen una frecuencia entre 20 Hz y 20 kHz se llaman ondas sonoras audibles. Las ondas ultrasonido son las ondas sonoras que tienen una frecuencia mayor a 20 kHz.

Las ondas sonoras audibles son clasificadas en dos categorías:

- i. Sonido musical: Es una onda sonora que produce un sonido placentero a nuestros oídos.

Los sonidos musicales se caracterizan por las siguientes propiedades:

- a. Son regulares en forma
- b. Tiene una periodicidad definida
- c. No presentan cambios bruscos de amplitud.

- ii. Ruido: Es una onda sonora que produce un sonido desagradable a nuestros oídos.

La onda sonora producida por un ruido se caracteriza por las siguientes propiedades:

- a. Son irregulares en forma
- b. No tienen una periodicidad definida
- c. Presentan cambios bruscos de amplitud.

## **2.4.2. Características de los sonidos musicales**

Los diferentes sonidos musicales se distinguen uno del otro por las siguientes características:

- a) Frecuencia o tono
- b) Intensidad
- c) Calidad o timbre

### **2.4.2.1. Frecuencia o tono**

La frecuencia está definida como el número de vibraciones de presión producidas por unidad de tiempo, midiéndose en ciclos por segundo o Hercios (Hz). Si la frecuencia de una nota musical es mayor, mayor es el tono y viceversa. La frecuencia es una cantidad física mensurable y puede ser medida con exactitud, mientras que el tono de una nota es una cantidad psicológica, es decir, una sensación mental experimentada.

Los ruidos generalmente están compuestos por variaciones de presión de diferentes frecuencias. El sistema auditivo humano está capacitado para oír sonidos de frecuencias comprendidas entre los 20 Hz. y los 20.000 Hz.

No todas las frecuencias son percibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible en la banda comprendida entre los 500 y 6.000 Hz.. Es decir, como se comprueba en las curvas de audición de la figura 6,3, el oído humano se comporta “algo sordo” en bajas y altas frecuencias.

La banda de frecuencias en la que fluctúa la voz humana está comprendida entre los 500 y los 2.000 Hz. Dada la amplia banda o gama de frecuencias audibles, para realizar estudios de ruido no es posible analizarlas una a una, por lo que ha sido dividida dicha banda en 10 bandas más pequeñas denominadas OCTAVAS que se denominan y conocen por su frecuencias centrales: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2.000, 4.000, 8.000 Hz. Para estudios de mayor precisión, se definen bandas de menor ancho, denominadas TERCIOS de OCTAVA, a saber 1/3 de las bandas anteriores. El análisis de frecuencia de bandas de octava es necesario para investigar una fuente sonora, y predecir las características de aislamiento necesarias para las barreras anti ruido, recintos aislantes o para medir la reducción de ruido entre muros comunes.

### 2.4.2.2. Intensidad

La intensidad de una onda sonora en un punto, está definida como la energía que fluye por segundo por unidad de área, se mantiene normalmente en el punto de la dirección de la propagación de la onda sonora. Y se calcula con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{Q}{tA}$$

Donde:

$Q$  – Energía de sonido (Watts).

$t$  - Tiempo (s)

$A$  – Área de la fuente ( $m^2$ ).

### 2.4.2.3. Timbre

El timbre de una onda sonora es la habilidad de distinguir entre dos o más sonidos musicales que tienen la misma frecuencia e intensidad.

## 2.4.3. Propagación del sonido

El sonido se propaga en el aire como las ondas en el agua. En campo libre, al doblarse la distancia, la amplitud de la onda se reduce a la mitad, con lo que el nivel de presión sonora disminuye en 6 dB. Si hay un obstáculo en el camino del sonido, parte se absorbe, parte se refleja y parte se transmite. La cantidad que se absorbe, refleja y transmite depende de las características acústicas del objeto, de su tamaño y de la longitud de onda del sonido.

En general, el objeto debe ser mayor de una longitud de onda para afectar al sonido de forma apreciable. Por ejemplo, 10 kHz la longitud de onda es de 3.4 cm, con lo cual un pequeño objeto puede perturbar el campo sonoro y con ello conseguir absorber el sonido. Pero, a 100 Hz, la longitud de onda es de 3.4 m. y el aislamiento es más difícil, esto se observa cuando tocan música en la habitación de al lado, el bajo es muy difícil de tapar. Luego, a mayor frecuencia, menor longitud de onda y resulta más fácil conseguir la absorción de dicho sonido. De igual forma, si la superficie no es porosa y es perfectamente rígida, no hay pérdida

de energía por la reflexión, de manera que la onda reflejada posee en mismo nivel de presión sonora en un punto determinado que el que produciría la fuente imagen si el muro se retirara y tuviera la misma potencia sonora que la fuente real. Por supuesto, no existe ninguna superficie física que se comporte como un reflector perfecto, parte de la energía es absorbida.

#### 2.4.4. Absorción acústica

El aislamiento acústico “airbone” se expresa mediante el índice de reducción de sonido ponderado. El índice de reducción de sonido  $R_w$  definido por la norma EN ISO 717-1 define la capacidad de una estructura (pared, techo, ventana, etc.) para impedir el paso del sonido a través de sí mismo y se expresa en dB. Cuanto mayor sea el índice de reducción de sonido, mayor será el aislamiento acústico de la estructura. Las propiedades de aislamiento del sonido de una muestra se evalúan a través de medidas fonométricas definidas por la norma ISO 10140. El  $R_w$  se calcula en muestras de tamaño real, como ventanas, puertas, divisiones, etc. La habilidad de los materiales y sistemas para disipar la energía acústica incidente se evalúa por el coeficiente de absorción acústica  $\alpha$  y está definido como la relación entre la energía acústica absorbida y la incidente (2). La energía acústica absorbida por un material es usualmente evaluada por la ecuación (1).

$$W_a = W_i - W_r - W_t \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (2)$$

Donde:

$W_i$  - Energía acústica incidente.

$W_r$  - Energía acústica reflejada del material.

$W_t$  - Energía acústica que pasa a través del material.

$W_a$  - Energía acústica absorbida por el material.

Este parámetro puede ser medido para muestras pequeñas usando el método del tubo de impedancia o para muestras reales usando el cuarto de reverberación definido por la norma ISO 354 o por la norma ASTM C423-09a. Esta norma internacional especifica un método

de medición del coeficiente de absorción sonora de materiales acústicos empleados como tratamientos de paredes o de techos, en una cámara reverberante.

Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de su energía es reflejada, pero un porcentaje de ésta es absorbido por el nuevo medio. La capacidad de absorción del sonido de un material es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo ego. Es un valor que varía entre 0 cuando toda la energía se refleja y 1 cuando toda la energía es absorbida. El coeficiente de absorción acústica de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del ángulo con que incide la onda sobre la superficie. Los materiales acústicos absorbentes reciben las ondas bajo distintos ángulos de incidencia más o menos aleatorios. El coeficiente de absorción está expresado en términos del coeficiente de reflexión.

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

#### **2.4.5. Medición de la absorción sonora de una sala**

Se utiliza una banda de ruido aleatorio como señal de prueba y activado por un tiempo suficiente (aproximadamente el tiempo de 20 dB de banda de prueba con la menor tasa de decaimiento) para que el nivel de la presión sonora alcance un estado estable. Cuando se apaga la señal, el nivel de presión acústico disminuirá y la tasa de decaimiento en cada banda de frecuencia puede determinarse midiendo la pendiente de una línea recta ajustada al nivel de presión acústico del promedio de la curva de decaimiento. La absorción de la sala y su contenido es calculado, sobre la base de los supuestos de que el campo acústico incidente es difuso antes y durante el decaimiento y que no entra energía adicional en la habitación durante el decaimiento, a partir de la fórmula de Sabine:

$$A = 0.9210 \frac{Vd}{c}$$

Donde:

A = Absorción de sonido, m<sup>2</sup>

V = Volumen de la cámara de reverberación, m<sup>3</sup>

$c$  = Velocidad del sonido, m/s

$d$  = Tasa de decaimiento, dB/s

#### **2.4.6. Cámara de reverberación**

Una cámara de reverberación es una sala diseñada para que el campo de sonido reverberante se aproxime a un campo de sonido difuso tanto en el estado estacionario, como cuando la fuente de sonido está encendida, y durante la decadencia, después de que la fuente de sonido se ha detenido.

La cámara debe estar suficientemente aislada para evitar que los ruidos externos y las vibraciones estructurales interfieran con las mediciones. El volumen de la cámara no debe ser inferior a  $125 \text{ m}^3$ . Se recomienda que el volumen sea de  $200 \text{ m}^3$  o superior.

#### **2.4.7. Coeficiente de reducción de ruido (NRC)**

El Coeficiente de Reducción de Ruido (NRC, por sus siglas en inglés) es una clasificación promedio de la cantidad de sonido que un producto acústico puede absorber. NRC tiene un valor entre 0 y 1; si el  $\text{NRC} = 0$ , quiere decir que el material no absorbe nada, por el contrario si  $\text{NRC} = 1$ , el material absorbe todo.

### **3. Metodología**

El desarrollo experimental se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa “Colectivo Bagatech SPR de RL de CV”, en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-Oaxaca-IPN) y en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET-UNAM).

#### **3.1. Diagrama de flujo de las fases del proyecto**

El presente trabajo involucra cuatro fases con el objetivo de obtener el conocimiento para desarrollar y caracterizar un panel modular biocompuesto, con fibras del bagazo cocido de agave, un polímero artificial y uno natural. El desarrollo del material se llevó a cabo en las Fases I y II y su caracterización en las Fases III y IV. En la Figura 3.1 se muestra un resumen de las fases del proyecto, las cuales se describen a detalle a continuación.

Fase 1: Determinar densidades y pesos específicos de las fibras de agave a utilizar.

Fase 2: Elaborar y seleccionar la mezcla óptima para la fabricación de paneles modulares.

Fase 3: Evaluar el coeficiente de absorción acústica del panel modular.

Fase 4: Evaluar el panel modular en términos físicos.



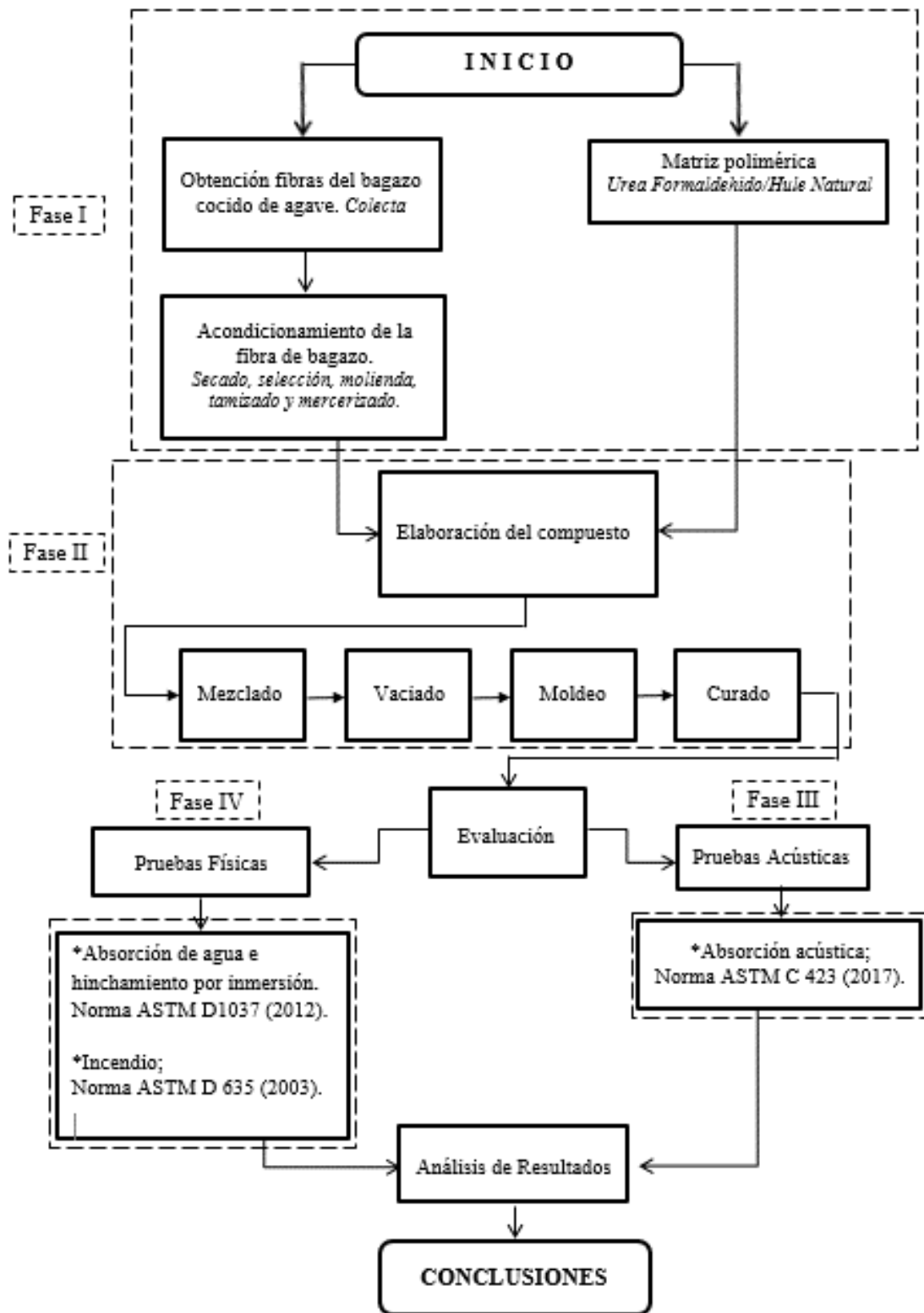


Fig. 3.1. Diagrama de flujo de las fases del proyecto.

### 3.2. Fase I – Determinar densidades y pesos específicos de las fibras de agave.

Esta fase se dividió en 3 etapas para la obtención de fibra útil de bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw, las cuales se muestran en la Fig.3.2 y se describen a continuación:

#### 3.2.1. Diagrama de flujo

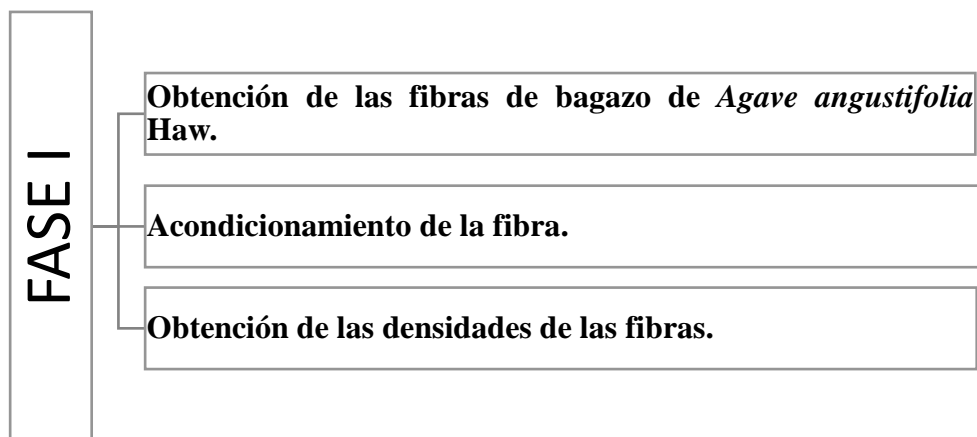


Fig. 3.2. Diagrama de flujo de la Fase 1.

#### 3.2.2. Obtención de las fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw.

##### 3.2.2.1. Colecta

En la presente investigación solo se utilizó bagazo cocido de agave como se muestra en la Fig.3.3, el cual se obtuvo en un palenque artesanal llamado “Don Agave”, localizado en la carretera internacional km. 26.5 en el municipio de Teotitlán del Valle, Tlacolula, Oaxaca, México.



Fig. 3.3. Bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw

### 3.2.2.2. Cuarteo

El cuarteo de muestras se realiza con el objetivo de obtener una muestra, proporciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio necesarias para dicho estudio.

Se utilizó la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-015-1985, correspondiente a residuos sólidos municipales, muestreo y método de cuarteo. Para realizar el cuarteo, se toman las bolsas de polietileno conteniendo los residuos sólidos, según la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-61. El material recolectado en las bolsas, se vacía formando un montón sobre una superficie plana horizontal (4 x 4 m) de cemento pulido o similar y bajo techo como se muestra en la Fig. 3.4. El montón, de residuos sólidos, se traspalea con pala y/o biello, hasta homogeneizarlos, a continuación, se divide en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D como se muestra en la Fig.3.5. Se eliminan las partes opuestas A y C o B y D, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kg de residuos sólidos, en los cuales se hace una selección de subproductos de acuerdo a la Norma NMX-AA-022. De las partes eliminadas del primer cuarteo, se toman 10 kg aproximadamente de residuos sólidos para los análisis del laboratorio, físicos, químicos y biológicos, con el resto se determina el peso volumétrico de los residuos sólidos “in Situ” según Norma Oficial Mexicana NOM-AA-19.



Fig. 3.4. Montón de fibras de bagazo de *Agave angusifolia* Haw



Fig.3.5. Norma de muestreo y cuarteo NMX-AA-015-1985

### 3.2.3. Acondicionamiento de la fibra.

#### 3.2.3.1. Secado

El bagazo cocido de agave se trasladó y se extendió sobre una superficie plana bajo un invernadero para evitar la incidencia directa de los rayos solares sobre el material y se dejó secar bajo las condiciones ambientales del lugar como se muestra en la Fig.3.6, a una temperatura promedio de 30 °C con una humedad relativa de 25% y durante 30 días o hasta alcanzar la humedad deseada.



Fig.3.6. Bagazo extendido de *Agave angustifolia* Haw

#### 3.2.3.2. Selección de Fibras

Es necesario realizar una selección de fibras útiles, ya que durante el proceso de molienda artesanal de los palenques mezcaleros quedan pedazos de piña de agave grandes debido a que no se lograron machacar de una manera uniforme. Las fibras se seleccionaron manualmente, separando una por una, y eliminando todo los residuos no deseados como se muestra en la Fig.3.7, Fig.3.8 y Fig.3.9.



Fig.3.7. Selección de fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw



Fig.3.8. Fibra Seleccionada



Fig.3.9. Desperdicio de Fibra

### 3.2.3.3. Molienda

Se utilizó un molino triturador de cuchillas para fibras vegetales modelo especial, con un motor trifásico marca U.S Motors. Potencia 5 HP, 2 polos, velocidad 3600 rpm, 230/460 volts proporcionado por la empresa “Colectivo Bagatech” como se muestra en la Fig.10.



Fig.3.10. Molino de Cuchillas

### 3.2.3.4. Tamizado

La fibra se clasificó por tamaños utilizando una cribadora especial proporcionada por la empresa “Colectivo Bagatech” como se muestra en la Fig.3.11, con una base de cribado con área de 2 m<sup>2</sup> para fibra de agave con motor eléctrico de 1hp, 2 niveles de malla metálica con base en perfil ptr. Para elaborar el material compuesto se utilizaron 3 rangos de partículas. En el primer nivel están las fibras que se molieron con la criba de 1/2” y pasaron la malla No. 20; pero fueron retenidas por la malla No. 30, en el segundo nivel están las fibras que pasaron la malla No. 30; pero fueron retenidas por la malla No. 50 y en el tercer nivel están las fibras que se molieron con la criba de 1/4” y pasaron por la malla No. 30; pero fueron retenidas por la malla No. 50. El tamaño de las partículas obtenidas en cada uno de los tamices se especifica en la Tabla 3.1.



Fig.3.11.Tamizadora de fibras vegetales

**Tabla 3.1 Tamices utilizados y obtención de partículas obtenidas.**

<b>Malla No.</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>50</b>
<b>Calibre (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	850	600	300
<b>Abertura (mm)</b>	0.85	0.60	0.36

### 3.2.3.5. Mercerizado

El mercerizado es un tratamiento que se realiza sobre las fibras celulósicas, para mejorar las propiedades de estabilidad dimensional y accesibilidad. Este efecto se produce al sumergir las fibras en una concentración de hidróxido de sodio (NaOH) con agua destilada. Este tratamiento ha sido aplicado industrialmente durante muchos años, sobre las fibras de celulosa, ya que produce cambios en su estructura que mejoran las propiedades de accesibilidad y estabilidad dimensional en función de las condiciones del tratamiento (concentración de NaOH, temperatura, tiempo y tipo de celulosa).

La mercerización se hizo con una disolución de Hidróxido de Sodio (NaOH) en una solución concentrada 10 wt %. La fibra se sumergió por un periodo de 24 h. como se muestra en la Fig. 3.12, posteriormente se lavó con agua destilada y se secó en un invernadero a temperatura ambiente por hasta alcanzar la humedad deseada como se muestra en la Fig. 3.13.



Fig. 3.12. Tratamiento alcalino



Fig. 3.13. Secado fibra tratada



### **3.2.4. Obtención de las densidades fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw.**

Se obtuvieron las densidades aparentes de las fibras de bagazo (FC, FM, FL) principalmente para el diseño de mezclas, el cual consiste en obtener la relación entre el peso seco suelto del material entre su volumen, incluidos todos los poros (saturables y no saturables) con unidades kg/m<sup>3</sup> o g/cm<sup>3</sup>. Para esta prueba se empleó un recipiente (molde) del cual se conocía su peso y su volumen, y una báscula digital con precisión de 5 gramos para poder determinar la densidad aparente mediante la relación:

$$\rho = \frac{\text{Masa de la fibra}}{\text{Volumen de la fibra}}$$

### 3.3. Fase 2 - Elaborar y seleccionar la mezcla óptima del panel modular biocompuesto para la construcción de paneles modulares.

Esta fase se dividió en 5 etapas para la selección de la mezcla óptima para fabricar el panel modular de *Agave angustifolia* Haw, las cuales se muestran en la Fig.3.14 y se describen a continuación:

#### 3.3.1. Diagrama de flujo

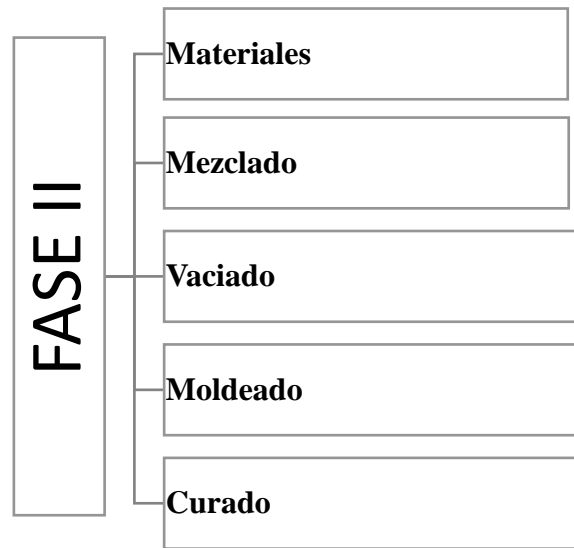


Fig.3.14. Diagrama de flujo de la Fase II.

#### 3.3.2. Materiales

##### 3.3.2.1. Fibras de bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw

El bagazo cocido es el material residual que se obtiene a partir de la destilación del mezcal, proceso artesanal que consta de las siguientes fases: a) cosecha del agave, b) seccionado de las piñas, c) cocción de los tallos, d) molienda del agave hidrolizado, e) fermentación del jugo y bagazo, y f) destilación de mosto y bagazo (Silva y Caballero, 2004).

### 3.3.2.2. Matriz Polimérica

- Resina Urea Formaldehido

La resina utilizada fue obtenida en la empresa Poli Resinas Hüttenes Albertus, S.A de C.V., bajo el código de producto PRHA-805 con formaldehído libre bajo, viscosidad baja y contenido de sólidos altos. En la Tabla 3.2 se presentan los datos específicos.

**Tabla 3.2. Especificaciones de Resina Urea Formaldehido**

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Contenido de sólidos	61 -67 %
Viscosidad brookfield	250 – 400 cps
Formol libre	1.3 % máximo
pH	7.5-8.5
Densidad	1.25 g/cm <sup>3</sup>

Según el fabricante, se recomienda usar el 60 a 80 % de resina PRHA-805 y de 2 a 9 % de catalizador base a la resina en la mezcla y el resto son cargas como pueden ser: harinas, caolín, cáscara de nuez, agua y barita.

Como catalizador para este tipo de resina se usó, el producto AR-90 es un catalizador en polvo a base de sales de amonio con una alta reactividad y muy soluble con resina urea-formaldehído. Pureza 98 % mínimo, PH 4.0 – 6.0

- Hule Natural

El hule natural fue adquirido de un productor local en la región del Istmo de Oaxaca, en la ciudad de Tuxtepec.

### 3.3.3. Mezclado

Para el mezclado, se utilizó un taladro de piso marca Truper de 5/8" proporcionado por la empresa "Colectivo Bagatech" como se muestra en la Fig.3.15., con un motor de 1.5 hp. y 12 velocidades. Los componentes, fibra, matriz polimérica, y agua fueron mezclados en una tina de plástico a una velocidad de 300 rpm por alrededor de 10 minutos o hasta alcanzar una homogeneidad en la mezcla como se muestra en la Fig.3.16.



Fig.3.15. Taladro de Columna



Fig.3.16. Mezclado

### 3.3.4. Vaciado por gravedad

El vaciado por gravedad se realizó sobre moldes que fueron fabricados en MDF de 12 mm y con medidas de 60 cm largo \* 60 cm ancho \* 5.0 cm de altura como se muestra en la Fig.3.17 y 3.18.

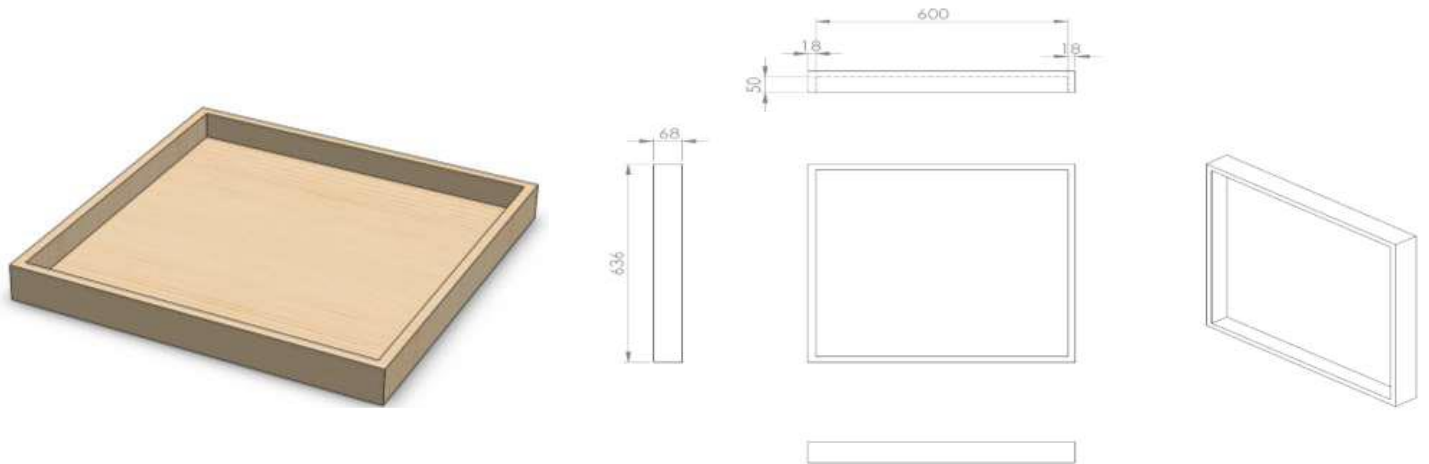


Fig. 3.17 Molde en MDF de 12 mm



Fig. 3.18 Vaciado en molde de MDF

### 3.3.5. Moldeado

El moldeado se hizo por compresión manual aplicando una carga de  $100 \text{ kg/cm}^2$ , como se muestra en la Fig. 3.19 y 3.20. La fabricación del panel compuesto se realizó en 2 capas para mejorar la compactibilidad del material y así reducir los espacios vacíos de aire.



Fig. 3.19 Moldeado en molde de MDF.

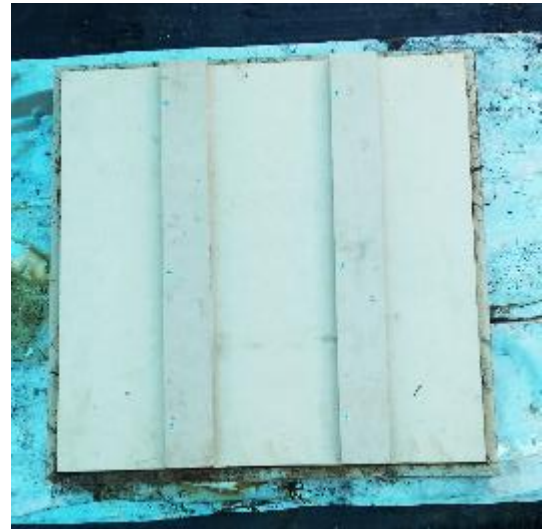


Fig. 3.20 Compresión manual.

### 3.3.6. Curado

Para el curado del material compuesto, los paneles se dejaron secar bajo un invernadero durante 28 días y bajo las condiciones ambientales del lugar, a una temperatura promedio de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  con una humedad relativa de 25% como se muestra en la Fig.3.21.



Fig.3.21. Curado de paneles 28 días

### 3.4. Fase 3 - Evaluar el coeficiente de absorción acústica del panel modular.

Esta fase se dividió en 5 etapas para la obtención del coeficiente de absorción acústica del panel modular biocompuesto por el método: Cámara Reverberante las cuales se muestran en la Fig.3.22 y se describen a continuación:

#### 3.4.1. Diagrama de flujo

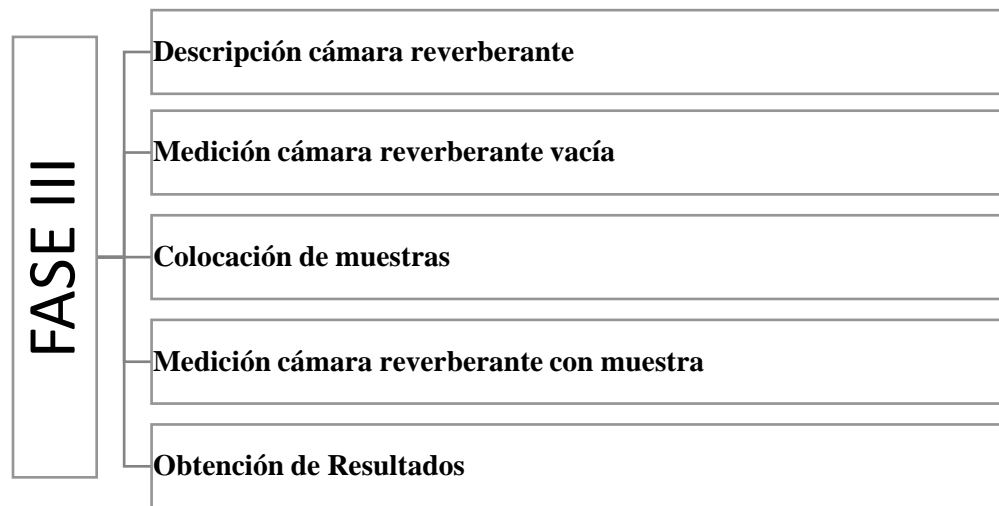


Fig.3.22. Diagrama del procedimiento para la obtención del coeficiente de absorción acústica por el método: cámara reverberante

#### 3.4.2. Descripción cámara reverberante

Los estudios de investigación se llevaron a cabo mediante la aplicación de un sistema de medición cuyos componentes cumplen los requisitos metrológicos que implican normas de precisión. Las mediciones se efectuaron en tres días diferentes en la Cámara Reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico UNAM, México., de acuerdo a la norma ASTM C 423. La cámara reverberante como se muestra en la Fig.3.23, está construida con doble muro de concreto, cada muro con un espesor de 30 cm y tiene las siguientes dimensiones: una base de 5.74m \* 8.10m y una altura de 4.66m; teniendo un volumen total de 216.66 m<sup>3</sup>.



Fig.3.23. Cámara Reverberante CCADET-UNAM

### 3.4.3. Medición de tiempo de reverberación y área de absorción sonora de cámara reverberante vacía

Se midió el tiempo de reverberación promedio en la cámara reverberante vacía como se muestra en la Fig.23 y bajo las siguientes condiciones de temperatura y humedad relativa: Temperatura promedio,  $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa promedio,  $HR = 62\%$  ( $\Delta HR = 2\%$ ).

La medición se realizó en 6 puntos fijos y 2 posiciones de fuente, con lo que se obtuvieron un total de 12 puntos de medición como lo indica la norma ASTM C 423 y como se muestra en al Fig.3.24. El equipo que se utilizó para la medición fue el siguiente: 6 micrófonos B&K 4166 de campo difuso, una de las fuentes sonoras omnidireccionales diseñadas en el LAV-CCADET-UNAM, un multiplexor B&K 2811 y un analizador B&K 2133.



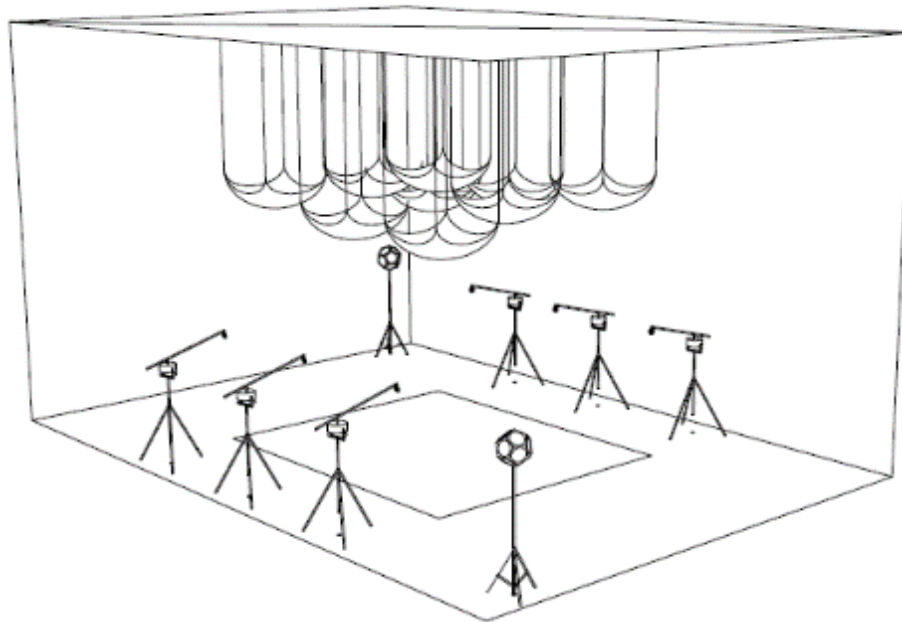


Fig.3.24. Diagrama para la medición del tiempo de reverberación de la cámara vacía.

Posteriormente se calcula el área de absorción sonora equivalente  $A_1$ , de la cámara reverberante vacía mediante la ecuación (1).

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad \dots\dots\dots \text{ecuación 1}$$

Donde:

- $V$  Es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara reverberante vacía
- $c$  Es la velocidad de propagación del sonido en el aire, en metros por segundo.
- $T_1$  Es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante vacía.
- $m_1$  Es el coeficiente de atenuación sonora, en metros recíprocos, calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 9613-1 empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición. El valor de  $m$  puede calcularse a partir del coeficiente de atenuación,  $\alpha$ , empleado en la Norma Internacional ISO 9613-1 de acuerdo a la fórmula:

$$m = \frac{\alpha}{10\lg(e)}$$

#### **3.4.4. Colocación muestras en cámara reverberante.**

Las muestras a medir fueron colocadas en la parte superior de un bastidor de 3.05 x 2.45 x 0.40 m., dentro de la Cámara Reverberante, como se muestra en la Fig.3.25, así como lo indican los puntos 9.1.1 y 9.1.2 de la norma ASTM C 423, la cual, recomienda un área de 6.69 m<sup>2</sup> para las mediciones.



Fig.3.25.Sistema de montaje especial de las muestras.

#### **3.4.5. Medición de tiempo de reverberación y área de absorción sonora de cámara reverberante con la muestra.**

Se midió el tiempo de reverberación con la muestra (los paneles montados en el bastidor) como se muestra en la Fig.3.26 bajo las siguientes condiciones de temperatura y humedad relativa: Temperatura promedio,  $T = 21^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa promedio,  $\text{HR} = 58\%$  ( $\Delta \text{HR} = 0\%$ ). Se calculó el área de absorción sonora equivalente  $A_2$ , de la cámara reverberante conteniendo la muestra mediante la ecuación (2).

Cálculo del área de absorción sonora equivalente  $A_2$ , de la cámara reverberante conteniendo la muestra.

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad \dots\dots\dots \text{ecuación 2}$$

Donde:

- $V$  Es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara reverberante vacía
- $c$  Es la velocidad de propagación del sonido en el aire, en metros por segundo.
- $T_2$  Es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante con la muestra del ensayo.
- $m_2$  Es el coeficiente de atenuación sonora, en metros recíprocos, calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 9613-1 empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición. El valor de  $m$  puede calcularse a partir del coeficiente de atenuación,  $\alpha$ , empleado en la Norma Internacional ISO 9613-1 de acuerdo a la fórmula:

$$m = \frac{\alpha}{10 \lg(e)}$$

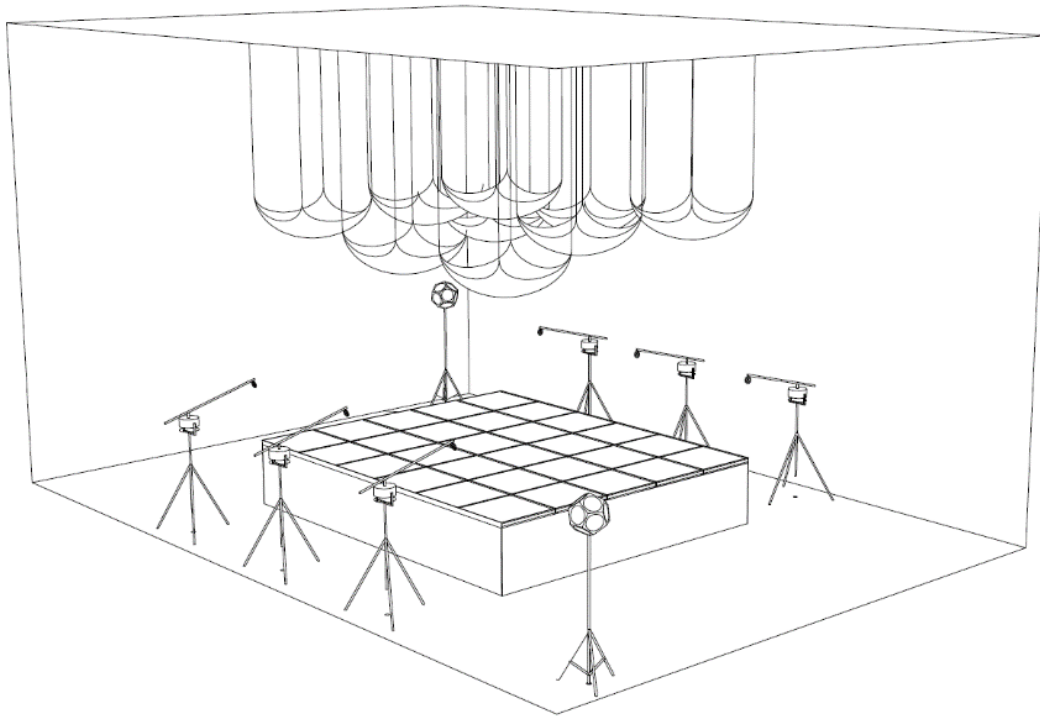


Fig.3.26 .Montaje de la muestra en el bastidor dentro de la Cámara Reverberante.

A partir de estos tiempos de reverberación, se calcula el área de absorción sonora equivalente a  $A_T$  por medio de la ecuación de Sabine.

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3 V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4 V (m_2 - m_1) \quad \dots\dots\dots \text{ecuación 3}$$

Donde:

$c_1$  Es la velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura  $t_1$ .

$c_2$  Es la velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura  $t_2$ .

Finalmente se obtiene el cálculo del área del coeficiente de absorción sonora  $\alpha_s$  de un absorbente plano mediante la fórmula:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad \dots\dots\dots \text{ecuación 4}$$

Donde:

$A_T$  Es el área de absorción sonora equivalente.

$S$  Es área, en metros cuadrados, de la muestra de ensayo.

### 3.5. Fase IV – Evaluar el panel modular biocompuesto en términos físicos.

Esta fase se dividió en 2 etapas para la evaluación del panel biocompuesto en términos físicos, las cuales se muestran en la Fig.3.27 y se describen a continuación:

#### 3.5.1. Diagrama de flujo

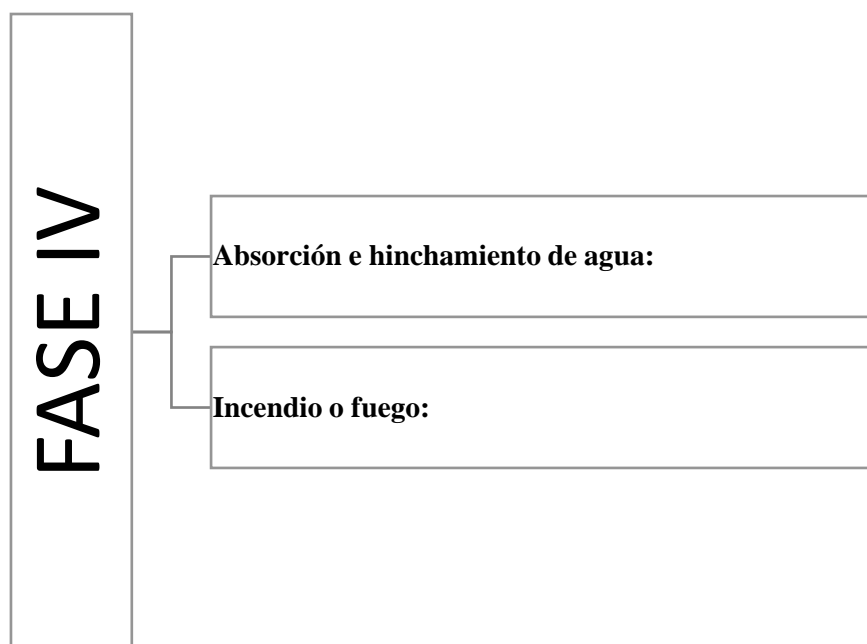


Fig.3.27. Diagrama de la fase IV.

#### 3.5.2. Absorción de agua e hinchamiento por inmersión

La metodología utilizada para las pruebas de absorción de agua e hinchamiento por inmersión, está basada en la Norma ASTM D 1037 – 2012. Se realizó la prueba para determinar las características de absorción de agua de los paneles. El método que se utilizó fue el método A (sección 23.5), la absorción de agua y el hinchamiento del grosor se expresa como un porcentaje, proporciona información sobre la absorción de agua a corto plazo (2 h) y largo plazo (2-más-22 h) y el rendimiento de hinchamiento del espesor.

### 3.5.2.1. Diseño de Experimento

Muestra	Dimensiones (mm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	#Repeticiones	Peso 2h (g)	Peso 2+22h (g)
HU	152*152*25	0.250	5		
UF	152*152*25	0.300	5		

### 3.5.2.2. Procedimiento

Fue necesario preparar al menos 5 especímenes en forma cuadrada, lo cuales se obtuvieron al cortar el panel modular para obtener una muestra representativa. Las dimensiones de los especímenes que se utilizaron fueron de 152 mm largo \* 152 mm ancho \* 25 mm de espesor como se muestran en las Fig. 3.28 y 3.29. Una vez medidos y registrados los pesos de los especímenes, se sumergieron horizontalmente en un recipiente con agua a una temperatura de  $20 \pm 1$  °C. La primera inmersión fue de 2 h. después el espécimen se sacó del agua y se dejó secar por  $10 \pm 2$  min, para remover el exceso de agua en la superficie, inmediatamente se registró el peso y su grosor. A continuación se volvió a sumergir los especímenes por un tiempo adicional de 22h en un recipiente con agua a una temperatura de  $20 \pm 1$  °C, inmediatamente después se registró el peso y su grosor.

Por último, después de las inmersiones en agua, los especímenes fueron secados bajo un invernadero y bajo las condiciones ambientales del lugar, a una temperatura promedio de 30°C y con una humedad relativa del 25%.



Fig.3.28. Muestras resina UF.



Fig.3.29. Muestras hule natural.

### 3.5.2.3. Calcular el contenido de humedad e hinchamiento

El contenido de humedad de los especímenes antes y después de la inmersión se calculó en base al peso seco. La cantidad de agua absorbida por la muestra durante la inmersión se calculó a partir del aumento de peso y se expresó como el porcentaje en volumen y en peso basado en el volumen y el peso, respectivamente, después del acondicionamiento. Suponiendo que la gravedad específica del agua es de 1.0 para este propósito. El hinchamiento del grosor se indicó como un porcentaje del espesor acondicionado. Las fórmulas utilizadas para estos cálculos son:

$$\text{Absorción de Agua (\%)} = \frac{W_f - W_i}{W_i} * 100\%$$

Donde:

$W_i$  = Peso inicial, en g.

$W_f$  = Peso final, en g.

$$\text{Hinchamiento por inmersión (\%)} = \frac{T_f - T_i}{T_i} * 100\%$$

Donde:

$T_i$  = Espesor inicial, en mm.

$T_f$  = Espesor final, en mm.

### 3.5.3. Prueba de incendio o fuego

La metodología para la pruebas de fuego utilizada está basada de acuerdo a la norma ASTM D635-03, la cual abarca una prueba de laboratorio a pequeña escala para comparar la velocidad lineal relativa de combustión o extensión y tiempo de combustión, o ambos, de plásticos, en forma de barras moldeadas o cortadas de hojas, placas o paneles, probados en la posición horizontal. Los resultados pretenden servir como una indicación preliminar de su aceptabilidad con respecto a la inflamabilidad para una aplicación en particular.

#### 3.5.3.1. Diseño de Experimento

Muestra	Dimensiones (mm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	#Repeticiones	Tiempo (s)	Longitud (mm)	Velocidad (mm/s)
HU	125*13*25	0.250	10			
UF	125*13*25	0.300	10			

Fue necesario preparar al menos 10 especímenes en forma de barra, lo cuales se obtuvieron al cortar el panel modular para obtener una muestra representativa. Las dimensiones de los especímenes fueron de  $125 \pm 5$  mm de largo por  $13.0 \pm 0.5$  mm ancho y de  $25 \text{ mm} \pm 1.0$  mm de espesor. Las pruebas se realizaron en condiciones atmosféricas de laboratorio a una temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y a una humedad relativa de 51%.

#### 3.5.3.2. Procedimiento

Una vez medidos y registrados los pesos de los especímenes, fue necesario marcar cada uno de ellos con 2 líneas perpendiculares al eje longitudinal de la barra, la primera a  $25 \pm 1$  mm y la segunda a  $100 \pm 1$  mm desde el lado final que se prendió fuego como se muestra en las Fig.3.30 y 3.31.



Fig.3.30. Muestras hule natural.



Fig.3.31. Muestras resina UF.



Se sujetó el espécimen en el extremo más alejado de la marca de referencia de 25 mm en un soporte universal con su eje longitudinal horizontal y su eje transversal inclinado a  $45 \pm 2^\circ$  como se ilustra en las Fig.3.32 y 3.33.

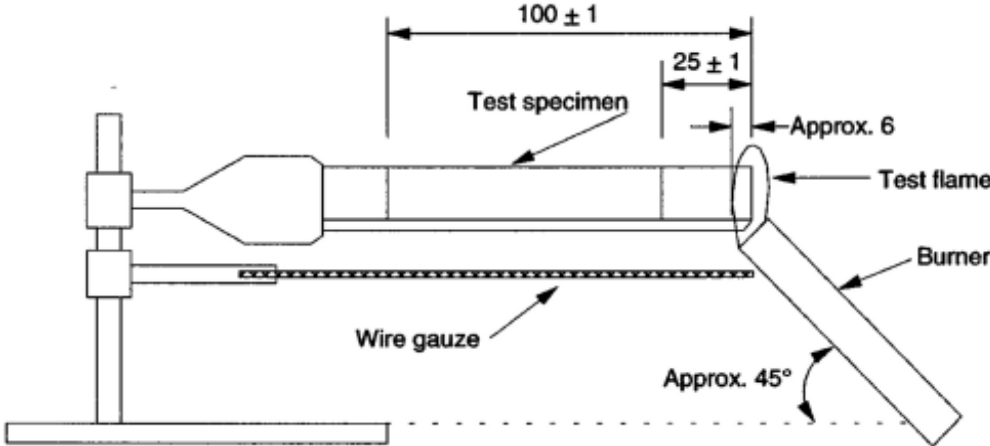


Fig. 3.32. Modelo de prueba, vista frontal.

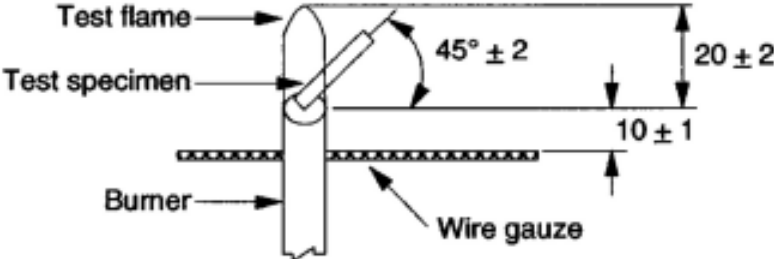


Fig. 3.33. Modelo de prueba, vista lateral.

Con el eje central del tubo del quemador en posición vertical, se colocó el quemador de modo que la llama de prueba choque en el extremo libre de la probeta a una profundidad de 6 mm, durante un tiempo de  $30 \pm 1$  s, sin cambiar la posición como se muestra en las Fig.3.34 y 3.35.



Fig.3.34. Colocación muestra hule natural.



Fig.3.35. Colocación muestra resina UF.

### 3.5.3.3. Calcular la velocidad lineal relativa de combustión

Para calcular la velocidad lineal relativa de combustión para cada espécimen donde la flama frontal llega a la marca de referencia de 100 mm, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{60L}{t}$$

Donde:

L= Longitud quemada, mm.

t = Tiempo, s.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados de la Fase I

En esta etapa se presentan los resultados de las densidades aparentes de las diferentes fibras de agave obtenidas durante el proceso de selección y acondicionamiento como son: fibra corta (FC), fibra mediana (FM) y fibra larga (FL) como se muestran en las Fig. 4.1 – 4.6.



Fig. 4.1. Fibra corta 10- 12 mm.



Fig. 4.2. Fibra mediana 23- 25 mm.



Fig. 4.3. Fibra larga 50 mm.



Fig. 4.4. Medición fibra corta.



Fig. 4.5. Medición fibra mediana.



Fig. 4.6. Medición fibra larga.

En la tabla 4.1 se puede apreciar que la densidad aparente del material incrementa conforme la dimensión de la fibra disminuye, ya que al ser más pequeña la fibra se acomoda mejor en el recipiente y deja menos espacios de aire. Por lo que la fibra que se seleccionó para futuras pruebas de la investigación, fue la fibra corta de 10 mm.

**Tabla 4.1 Densidad Aparente de las fibras de Agave**

<b>TAMAÑO DE FIBRAS</b>	<b>DIMENSION (mm)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>FC</b>	10-12	0.250
<b>FM</b>	23-25	0.150
<b>FL</b>	50	0.100

En el presente trabajo de investigación, la técnica del MEB fue muy útil porque se pudo observar e identificar a escala microscópica como la fibra quedo totalmente limpia después del proceso de mercerizado anteriormente descrito, la cual no sufrió daño superficial como se puede observar en las Fig.4.7-4.10

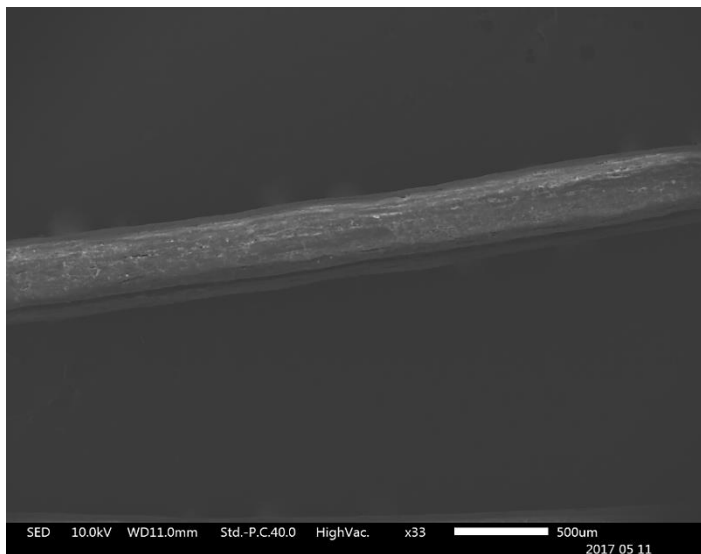


Fig. 4.7. MEB fibra sola a 33X.

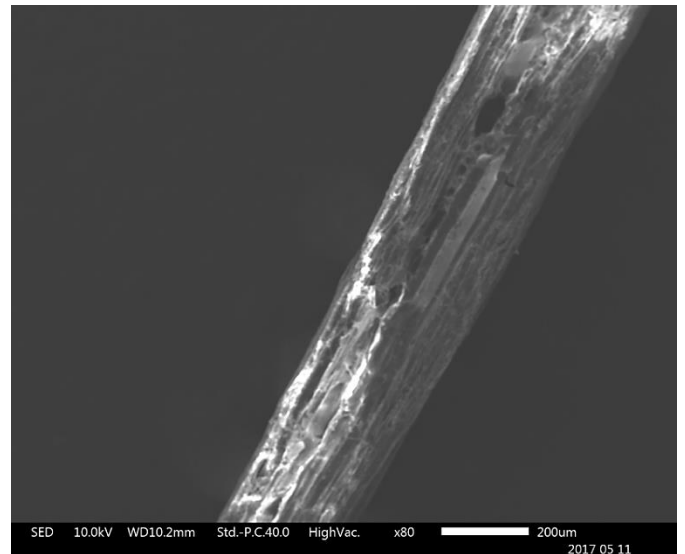


Fig. 4.8. MEB fibra sola a 80X.

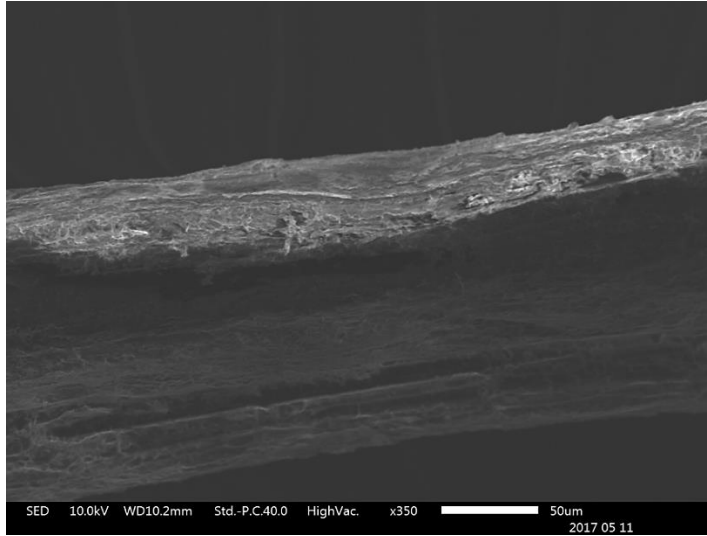


Fig. 4.9. MEB fibra sola a 350X.

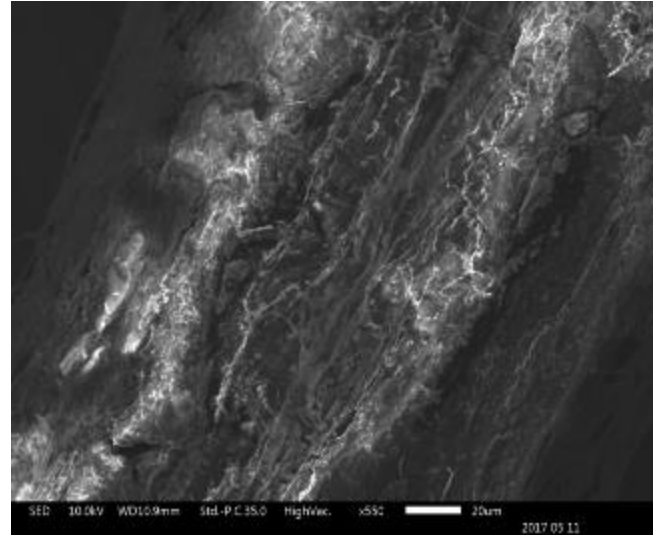


Fig. 4.10. MEB fibra sola a 550X.

## 4.2. Resultados de la fase II

En esta etapa se presentan los resultados de la mezcla óptima para fabricar el panel modular de *Agave angustifolia* Haw. En la tabla 4.2 se muestran las mezclas con las proporciones de fibra vs. matriz que se realizaron con la fibra corta de 10 mm seleccionada en la fase previa. En la Fig. 4.11 y 4.12 se muestran los cubos con la proporción 1:2 de fibra vs. matriz, los cuales fueron los que mejor adhesividad y manejabilidad presentaron a la hora de producirlos, tanto de la matriz sintética (UF) como de la matriz natural (HU) respectivamente.

**Tabla 4.2 Tabla de mezclas Refuerzo vs Matriz**

<b>DENSIDAD (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MEDIDAS (cm)</b>	<b>% FIBRA VS MATRIZ</b>	<b>#REPETICIONES</b>
UF1 - 100	5.0 * 5.0 * 5.0	1 vs 1	5
UF2 - 150	5.0 * 5.0 * 5.0	1 vs 1.5	5
UF3 - 250	5.0 * 5.0 * 5.0	1 vs 2.0	5
HU1 - 100	5.0 * 5.0 * 5.0	1 vs 1	5
HU2 - 150	5.0 * 5.0 * 5.0	1 vs 1.5	5
HU3- 250	5.0 * 5.0 * 5.0	1 vs 2.0	5



Fig. 4.11. Cubos de fibra de agave de UF.



Fig. 4.12. Cubos de fibra de agave de HU.

Se tomaron también imágenes de corte transversal del aglutinamiento del material con las dos matrices empleadas, esto para poder identificar su estructura y poder entender mejor el comportamiento de cada uno de los mismos. Las Fig. 4.13-4.16 muestran como el material de hule natural se acomoda mejor que el de resina Uf, pues logramos ver como las fibras se alinean en capas debido a la presión ejercida a la hora de fabricar los compuestos.



Fig.4.13 Compuesto HU X-22

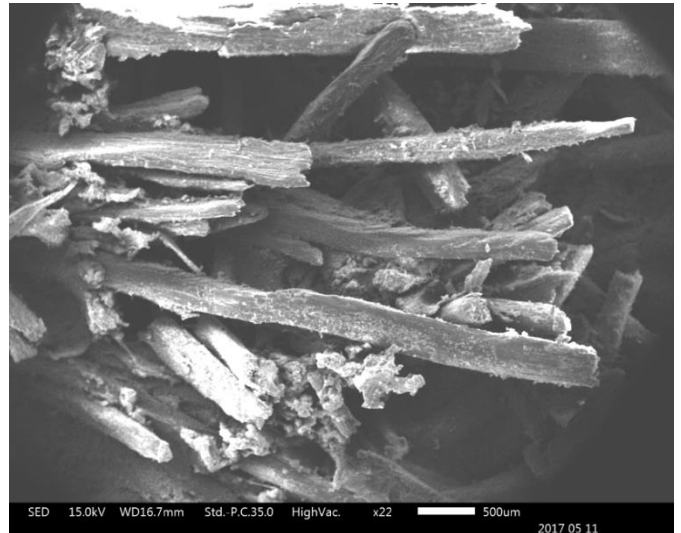


Fig.4.14 Corte transversal HU X-22

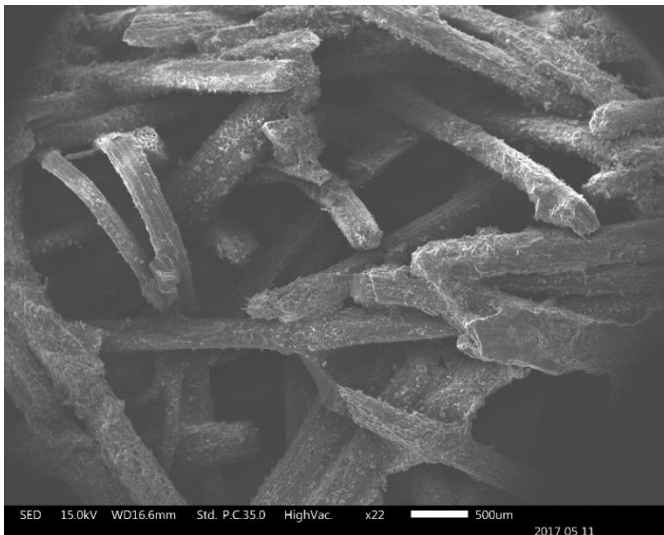


Fig.4.15 Compuesto UF X-22

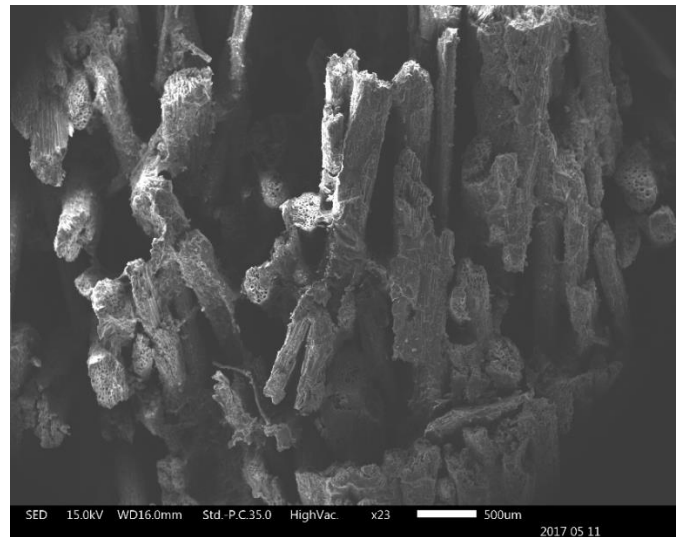


Fig.4.16 Corte transversal UF X-23

### 4.3. Resultados de la fase III

En esta etapa se reportan las mediciones que se realizaron con el panel modular acústico hecho de fibras de Agave. Las mediciones se efectuaron en tres días diferentes en la Cámara Reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM, de acuerdo a la norma ASTM C 423.

#### 4.3.1. Medición del tiempo de reverberación y cálculo de su incertidumbre.

##### 4.3.1.1. Paneles resina urea formaldehido

Para calcular el coeficiente de absorción del material fue necesario medir el tiempo de reverberación de la cámara reverberante en tres casos para los paneles de resina urea formaldehido: 1) Cámara vacía, 2) Cámara con bastidor y 3) Cámara con bastidor y muestra montada. En la tabla 4.3 se muestran los tiempos de reverberación para cada caso y en la Fig.4.17 se muestran las gráficas correspondientes.

**Tabla 4.3. Tiempo de reverberación e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava.**

Frecuencia 1/3 de octava (Hz)	Tiempo de Reverberación Muestra UF (s)	Desviación	Tiempo de Reverberación Bastidor (s)	Desviación	Tiempo de Reverberación Cámara Vacía (s)	Desviación
100	16.53	1.39	22.01	1.29	27.48	1.29
125	11.9	1.95	19.37	1.32	23.76	1.38
160	8.4	1.97	12.86	0.88	17.17	1.81
200	5.61	0.66	10.77	0.78	13.12	1.29
250	5.62	0.69	9.85	0.77	11.85	0.50
315	5.25	0.35	8.79	0.31	10.8	0.61
400	6.07	0.37	10.46	0.33	11.48	0.55
500	6.56	0.40	10.96	0.34	12.58	0.49
630	5.35	0.25	9.77	0.37	10.63	0.34
800	4.91	0.28	9.19	0.34	10.02	0.24
1000	4.7	0.10	8.77	0.40	9.73	0.31
1250	4.3	0.24	8.12	0.25	8.94	0.32
1600	3.96	0.15	7.00	0.17	7.89	0.17
2000	3.57	0.12	6.13	0.19	7.01	0.15
2500	3.13	0.10	5.04	0.14	5.71	0.11
3150	2.77	0.04	4.38	0.10	4.84	0.16
4000	2.28	0.04	3.49	0.08	3.82	0.11
5000	1.99	0.04	2.90	0.08	3.14	0.05



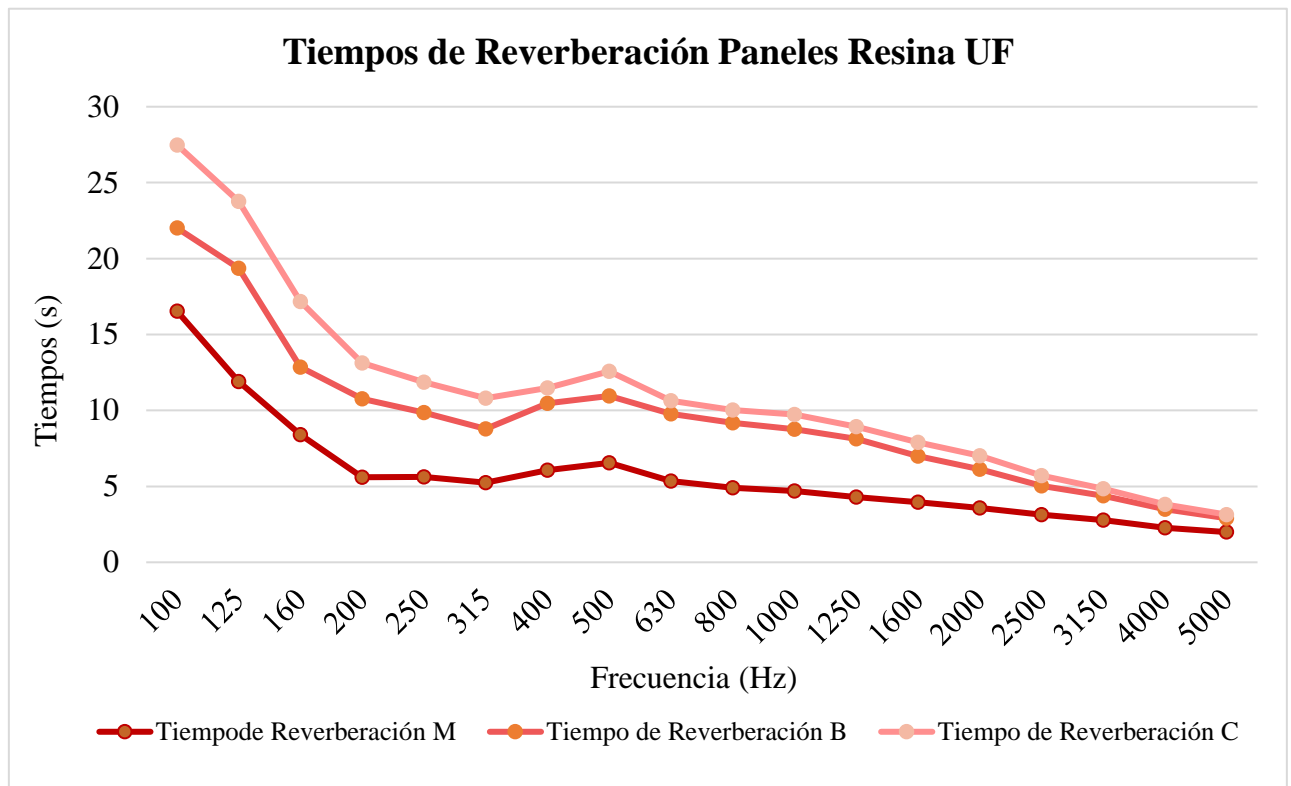


Figura 4.17. Tiempos de reverberación en la Cámara Reverberante con las muestra de resina urea formaldehído (M), con el bastidor (B) y con la cámara vacía (C).

Las tres mediciones mencionadas, se realizaron para determinar la influencia que tiene el bastidor en el cálculo del coeficiente de absorción acústica y poder obtener un resultado real.

#### 4.3.1.2. Paneles hule natural

Para calcular el coeficiente de absorción del material fue necesario medir el tiempo de reverberación de la cámara reverberante en dos casos para los paneles de hule natural: 1) con muestra, es decir, con los paneles colocados en el interior de la Cámara Reverberante, y 2) Cámara reverberante vacía. En la tabla 4.4 se muestran los tiempos de reverberación para cada caso y en la Fig.4.18 se muestran las gráficas correspondientes.

**Tabla 4.4. Tiempo de reverberación e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava**

<b>Frecuencia 1/3 de octava (Hz)</b>	<b>Tiempo de Reverberación Muestra HU (s)</b>	<b>Desviación</b>	<b>Tiempo de Reverberación Cámara Vacía (s)</b>	<b>Desviación</b>
100	21.685	1.14	25.98	1.29
125	18.825	1.315	22.49	1.33
160	12.76	1.14	16.17	1.41
200	10.185	0.805	13.38	1.11
250	8.64	0.46	11.44	0.63
315	7.47	0.435	10.43	0.50
400	7.17	0.29	11.54	0.60
500	7.145	0.3	12.36	0.54
630	5.755	0.215	10.54	0.39
800	5.045	0.255	9.69	0.24
1000	4.295	0.185	9.51	0.33
1250	3.795	0.15	8.87	0.25
1600	3.34	0.11	7.67	0.18
2000	3.105	0.14	6.83	0.21
2500	2.86	0.1	5.62	0.16
3150	2.715	0.075	4.79	0.12
4000	2.425	0.065	3.88	0.10
5000	2.12	0.045	3.20	0.08

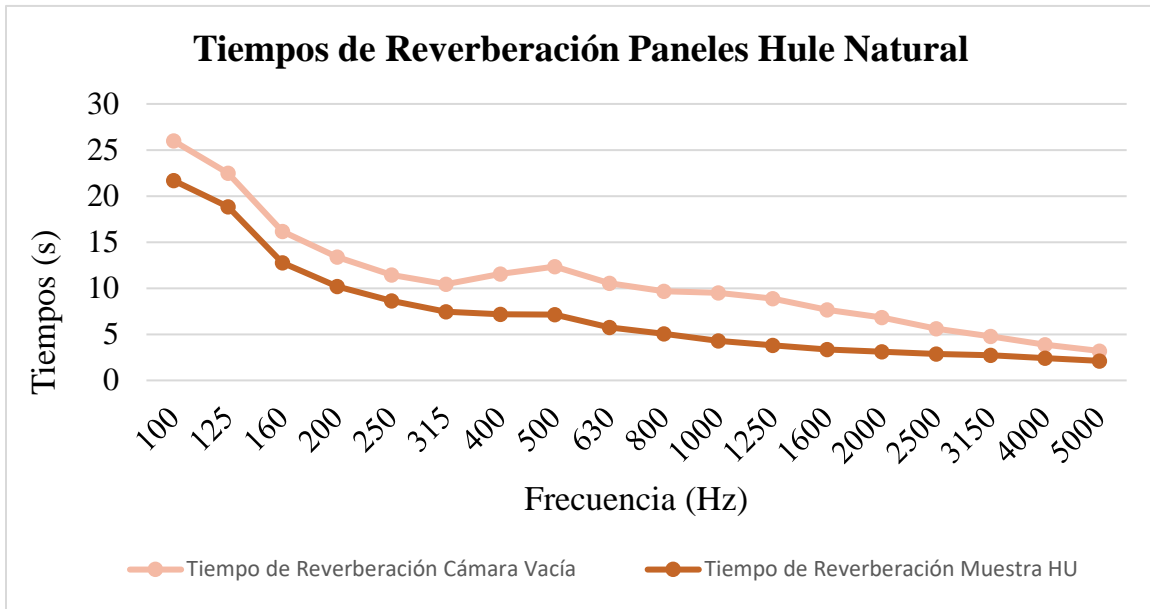


Figura 4.18. Tiempos de reverberación en la Cámara Reverberante con las muestras de hule natural (HU) y con la cámara vacía (C).

#### 4.3.1.3. Tiempos de reverberación Panel UF vs Panel HU

En la Fig.4.19 se muestra la comparativa de los tiempos de reverberación de los paneles de resina urea formaldehido y los paneles de hule natural. Entre las frecuencias 100-800 Hz., el Panel UF presenta menores tiempos de reverberación y conforme la frecuencia va aumentando el Panel HU presenta menores tiempos de reverberación.

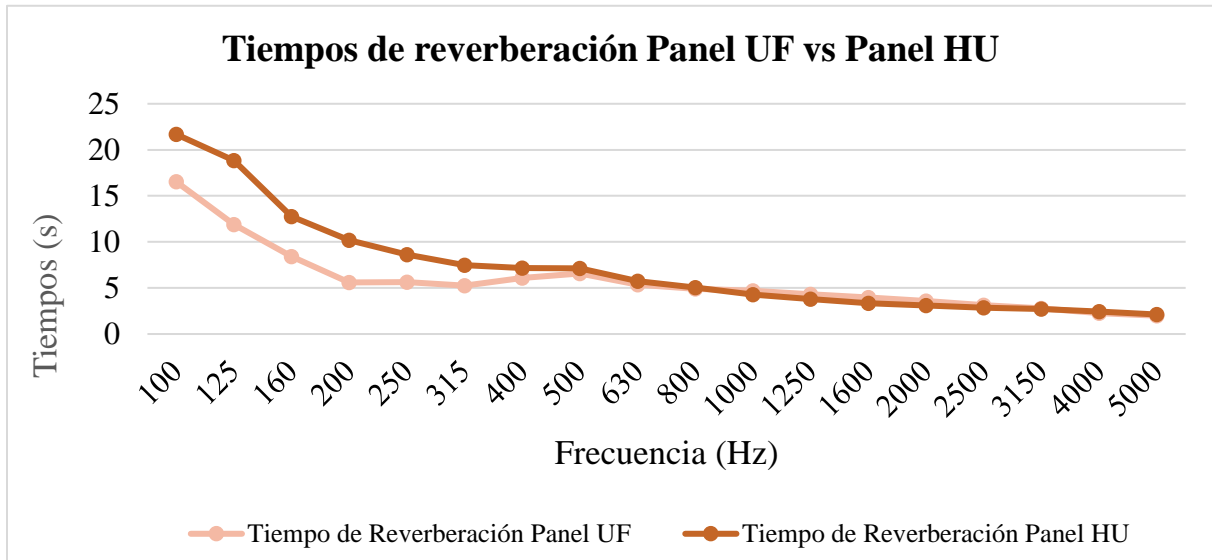


Figura 4.19. Tiempos de reverberación en la Cámara Reverberante con las muestras de urea formaldehido (UF) y con hule natural (HU).

### 4.3.2. Cálculo del coeficiente de absorción y su incertidumbre.

#### 4.3.2.1. Paneles resina urea formaldehido

El cálculo de los coeficientes de absorción se realiza normalmente considerando los tiempos de reverberación de la cámara vacía y los tiempos de reverberación con la muestra. En este caso como se utilizó un bastidor para colocar la muestra, el cálculo del coeficiente de absorción se realizó considerando los tiempos de reverberación medidos en la cámara con espécimen y bastidor y dos condiciones de cámara vacía: 1) con bastidor sin muestra, los cuales se indican en la columna 2 de la tabla 4.5, y 2) sin bastidor, los cuales se indican en la columna 4 de la tabla 4.5.

**Tabla 4.5.- Coeficientes de absorción e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava.**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Coefficiente de Absorción (Cámara vacía con bastidor)</b>	<b>Desviación Normal</b>	<b>Coefficiente de Absorción (Cámara vacía sin bastidor)</b>	<b>Diferencia</b>
100	0.07	0.027	0.11	0.04
125	0.15	0.066	0.20	0.05
160	0.19	0.133	0.28	0.09
200	0.4	0.102	0.48	0.08
250	0.36	0.108	0.44	0.08
315	0.36	0.062	0.46	0.10
400	0.32	0.049	0.36	0.04
500	0.28	0.045	0.34	0.06
630	0.39	0.044	0.43	0.04
800	0.44	0.056	0.48	0.04
1000	0.46	0.033	0.51	0.05
1250	0.51	0.063	0.56	0.05
1600	0.51	0.046	0.59	0.08
2000	0.54	0.049	0.64	0.10
2500	0.56	0.055	0.67	0.11
3150	0.62	0.035	0.72	0.10
4000	0.71	0.046	0.82	0.11
5000	0.73	0.061	0.86	0.13

<b>NRC</b>	<b>0.43</b>	<b>± 0.06</b>
------------	-------------	---------------

En la columna 5 de la tabla 4.5 se puede observar una diferencia significativa entre los valores de la columna 2 (coeficiente absorción calculado considerando cámara vacía con bastidor) y la columna 4 (coeficiente de absorción considerando cámara vacía), por lo que, de acuerdo al punto 9.1.2 de la norma ASTM C 423, los valores del coeficiente de absorción que se deben considerar como válidos son los de la columna 2 de la tabla 4.5, con los que se obtiene la gráfica de la Fig.4.20 y un NRC de  $0.43 \pm 0.06$ .

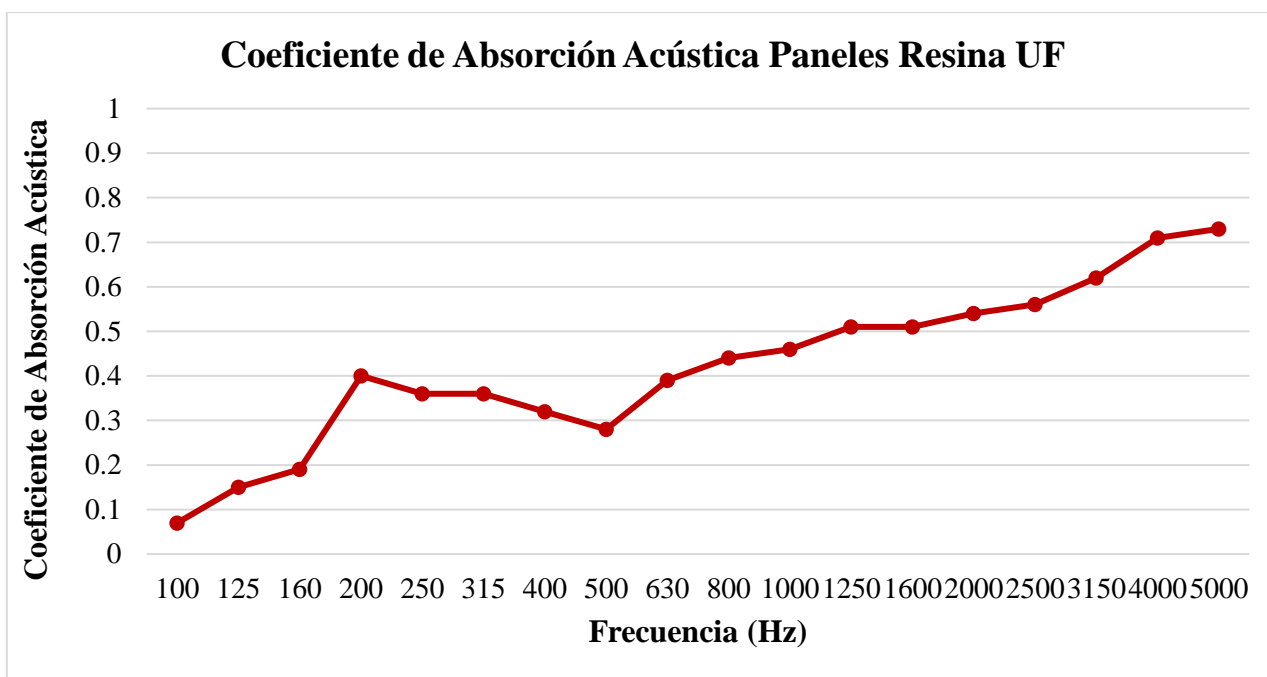


Figura 4.20. Medición del coeficiente de absorción por tercios de octava de los paneles bajo la norma ASTM C 423, en la condición de Cámara Reverberante con el bastidor.

#### 4.3.2.2. Paneles hule natural

Con las mediciones de los tiempos de reverberación, que se muestran en la tabla 4.4, el volumen de la cámara y el cálculo de la velocidad del sonido, se obtuvieron los coeficientes de absorción y el NRC que se muestran en la tabla 4.6 y en la Fig.4.21 respectivamente.

Tabla 4.6.- Coeficientes de absorción e incertidumbres de medición en bandas de 1/3 de octava.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente de Absorción	Desviación Normal
100	0.04	0.02
125	0.04	0.03
160	0.08	0.06
200	0.11	0.07
250	0.13	0.05
315	0.18	0.06
400	0.25	0.05
500	0.28	0.05
630	0.37	0.05
800	0.44	0.07
1000	0.59	0.07
1250	0.70	0.07
1600	0.79	0.07
2000	0.82	0.10
2500	0.80	0.09
3150	0.74	0.08
4000	0.72	0.09
5000	0.75	0.09

<b>NRC</b>	<b>0.45</b>	<b>± 0.07</b>
------------	-------------	---------------

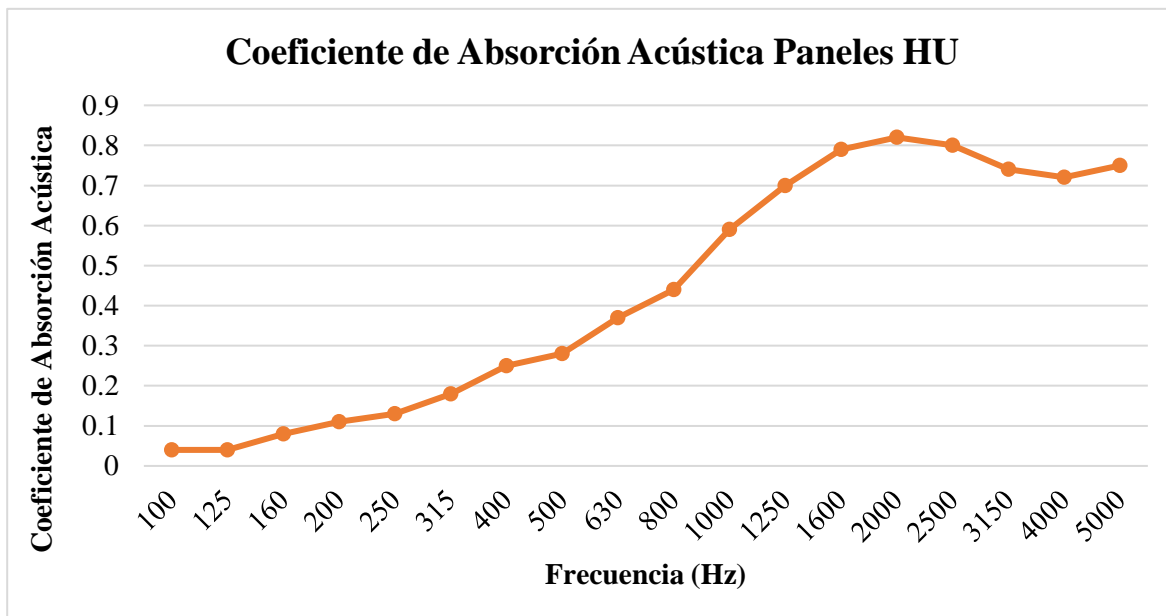


Figura 4.21. Medición del coeficiente de absorción por tercios de octava de los paneles bajo la norma ASTM C 423, en la condición de Cámara Reverberante.

#### 4.3.2.3. Absorción Acústica Paneles Resina UF Vs Paneles Hule Natural

En la Fig. 4.22 se muestran los coeficientes de absorción acústica de los paneles de hule natural y los paneles de urea formaldehido. Como anteriormente se mostró en los tiempos de reverberación, en las frecuencias menores el Panel UF presenta mejor absorción acústica pero conforme la frecuencia va en aumento, el Panel HU presenta un coeficiente de absorción acústica mayor.

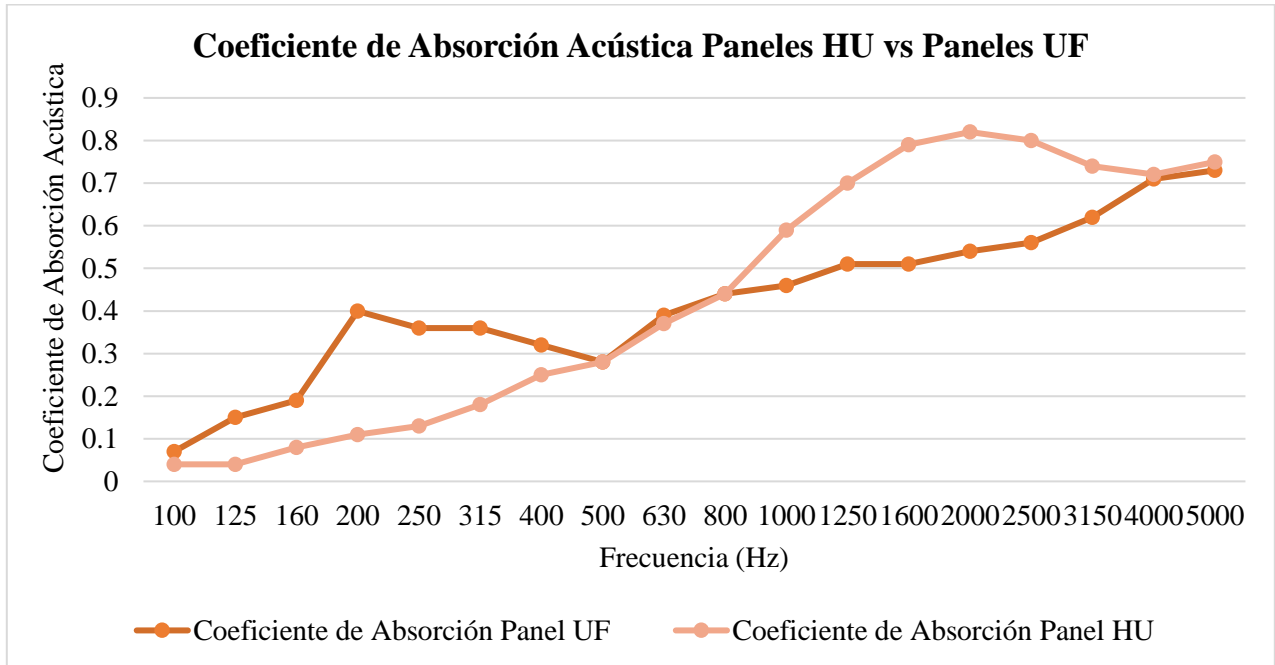


Figura 4.22. Medición del coeficiente de absorción por tercios de octava de los paneles bajo la norma ASTM C 423, en la condición de Cámara Reverberante.

**Tabla 4.7 Propiedades acústicas de materiales naturales y reciclados no convencionales por el método de cámara reverberante.**

<b>Material</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Coefficiente de Absorción Acústica</b> $\alpha > 0.4 >$ para $f >$	<b>Referencia</b>
Caña	140	13,000 - 19,000	160 Hz $\alpha = 1 >$ para $f >$ 315 Hz	Oldham, D.J. et al. (2011)
Bagazo de Caña + UF y MF	12	0.300, 0.400, 0.500	$\alpha > 0.5 >$ para $f >$ 1000 Hz	Doost-hoseini, K. et al. (2014)
Textil Reciclado (comercializado)	89	N/A	NRC = 1.0	Intini, F. et al.(2011)
Textil Reciclado (comercializado)	50	N/A	NRC = 0.85	<a href="http://www.maiano.it/">http://www.maiano.it/;</a>
Textil Reciclado (comercializado)	30-60	N/A	0.62	<a href="https://www.diasen.com/">https://www.diasen.com/;</a>

**Tabla 4.8 Propiedades acústicas de materiales comerciales.**

<b>Material</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Coefficiente de Absorción Acústica</b>	<b>Referencia</b>
Revestimiento Air Guard	20	N/A	0.7	<a href="http://www.armstrong.com">www.armstrong.com</a>
Espuma de Poliuretano	N/A	N/A	0.32-.05	<a href="http://www.andimat.es">www.andimat.es</a>
Lana de Poliester	N/A	N/A	0.5-0.80	<a href="http://www.andimat.es">www.andimat.es</a>
Vidrio Expandido	N/A	N/A	0.4	<a href="http://www.andimat.es">www.andimat.es</a>
Fibra de vidrio	N/A	N/A	0.75	<a href="http://www.andimat.es">www.andimat.es</a>



## 4.1. Resultados de la fase IV

En esta etapa se presentan resultados de las evaluaciones físicas que se realizaron a los paneles biocompuestos, tanto de las pruebas de absorción e hinchamiento de agua como las de incendio o fuego.

### 4.1.1. Absorción de agua e hinchamiento por inmersión

#### 4.1.1.1. Muestras de hule natural

En la tabla 4.9 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de absorción de agua e hinchamiento por inmersión, basada en la Norma ASTM D 1037 – 2012 de las muestras de hule natural.

**Tabla 4.9- Datos de absorción de agua e hinchamiento por inmersión.**

Muestra	%	%	%	%
	Absorción 2 h	Hinchamiento 2 h	Absorción 2+22 h	Hinchamiento 2 +22 h
HU-1	51	8	53	10
HU-2	50	6	52	7
HU-3	49	7	50	8
HU-4	49	7	52	9
HU-5	52	6	52	8
<b>Promedio</b>	<b>50 %</b>	<b>7 %</b>	<b>52 %</b>	<b>9 %</b>

#### 4.1.1.2. Muestras de resina urea formaldehido

En la tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de absorción de agua e hinchamiento por inmersión, basada en la Norma ASTM D 1037 – 2012 de las muestras de resina urea formaldehido.

**Tabla 4.10- Datos de absorción de agua e hinchamiento por inmersión.**

Muestra	%	%	%	%
	Absorción 2 h	Hinchamiento 2 h	Absorción 2+22 h	Hinchamiento 2 +22 h
UF-1	46	2	48	3
UF-2	47	3	50	4
UF-3	48	1	50	3
UF-4	48	3	50	4
UF-5	48	1	49	3
<b>Promedio</b>	<b>48 %</b>	<b>2 %</b>	<b>49 %</b>	<b>3 %</b>

#### 4.1.2. Incendio o fuego

##### 4.1.2.1. Muestras resina urea formaldehido

Se probaron 10 especímenes de paneles de resina urea formaldehido como se muestra en la Fig. 4.23 - 4.25. En la tabla 4.11 se muestran los resultados obtenidos y se da la velocidad lineal relativa de combustión.



Fig.4.23 Muestra UF1



Fig.4.24 Muestra UF10



Fig.4.25. Muestras de resina de urea formaldehido quemadas.

**Tabla 4.11. Velocidad Lineal de Combustión Muestra Resina UF**

<b>Espécimen</b>	<b>Dimensión (mm)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>T (min)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>V (mm/min)</b>
1 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.53	N/A	N/A
2 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.48	N/A	N/A
3 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.46	N/A	N/A
4 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.40	N/A	N/A
5 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.45	N/A	N/A
6 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.44	N/A	N/A
7 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.45	N/A	N/A
8 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.46	N/A	N/A
9 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.42	N/A	N/A
10 UF	120 * 15 * 25	10 g	0.39	N/A	N/A

La velocidad lineal promedio de combustión no fue posible determinarse para este tipo de compuesto, ya que según la norma ASTM D635 el material no es propenso a quemarse.

#### 4.1.2.2. Muestras hule natural

Se probaron 3 especímenes de paneles de hule natural como se muestra en la Fig. 4.26 - 4.29. En la tabla 4.12 se muestran los resultados obtenidos y se da la velocidad lineal relativa de combustión.



Fig. 4.26 Muestra HU1



Fig.4.27 Muestra HU2



Fig.4.28 Muestra HU3



Fig.4.29. Muestras de resina de hule natural quemadas

**Tabla 4.12. Velocidad Lineal de Combustión Muestra Hule Natural**

<b>Espécimen</b>	<b>Dimensión (mm)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>T (min)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>V (mm/min)</b>
1 Hu	120 mm*15mm*25mm	14 g	12.35	75	364.37247
2 Hu	120 mm*15mm*25mm	14 g	11.27	75	399.290151
3 Hu	120 mm*15mm*25mm	14 g	11.21	75	401.427297

La velocidad lineal promedio de combustión del material compuesto con hule natural es de 388.36 mm/min.

## 5. CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los resultados de la presente investigación se puede concluir lo siguiente:

Mediante la microscopía electrónica de barrido se comprueba que el método utilizado para la obtención y acondicionamiento de fibra útil de bagazo de *Agave Angustifolia* Haw fue el óptimo, ya que no presenta daños en su estructura.

En cuanto a absorción acústica se refiere, el mejor NRC se obtuvo en el panel HU, teniendo un valor de 0.45. y su mayor NRC se alcanzó en la frecuencia de 2000 Hz. con un valor de 0.82, superando algunos aislantes acústicos comerciales, en cuanto al panel UF el mayor valor NRC alcanzado fue de 0.75 en la frecuencia 5000 Hz donde la longitud de onda es muy pequeña.

Las pruebas de fuego mostraron que la velocidad lineal promedio de combustión del panel UH fue de 388.36 mm/min, mientras que la del panel UF no fue posible determinarse ya que según la norma ASTM D635 el material no es propenso a quemarse.

Las pruebas de absorción e hinchamiento de agua promedio mostraron que los paneles UF resultaron con mejores porcentajes que los paneles de HU, con un incremento de 52% en cuanto a su peso y 9 % de hinchamiento respecto a sus dimensiones.

## **6. RECOMENDACIONES**

Con base a los resultados alcanzados en la presente investigación sobre el diseño de un panel modular biocompuesto con características de absorción acústica se recomienda lo siguiente:

- Realizar investigación con otras longitudes de fibra menores a 10 mm
- Evaluar las propiedades mecánicas del material biocompuesto como son: la resistencia a la flexión y resistencia a la compresión.
- Evaluar la porosidad del material biocompuesto.

## 7. REFERENCIAS

- Abdul Khalil, H., Firdaus, M., Jawaid, M., Anis, M., Ridzuan, R., Mohamed, A., 2010a. Development and material properties of new hybrid medium density fiberboard from empty fruit bunch and rubberwood. *Mater. Des.* 31, 4229–4236.
- Aisyah, H., Paridah, M., Sahri, M., Anwar, U., Astimar, A., 2013. Properties of medium density fiberboard (MDF) from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) core as function of refining conditions. *Compos. Part B: Eng.* 44, 592–596.
- ASTM C423-2017 Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.
- ASTM D1037-2012 Evaluating Properties of Wood Base Fiber and Particle panel Materials.
- Aziz SH, Ansell MP, Clarke SJ, Panteny SR. Modified polyester resins for natural fibre composites. *Compos Sci Technol* 2005; 65:525–35.
- Baena González, A., 2005. Aprovechamiento del bagazo de maguey verde (*Agave salmiana*) de la agroindustria del mezcal en San Luis Potosí para la producción de Hongo Ostra (*Pleurotus Ostreatus*). Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
- Balam-Cocom, R. J. Duarte-Aranda, S. y Canche-Escamilla, G. (2006). Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la piña de henequén y propileno. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(Sul), p 39-44.
- Benko, Z., Andersson, A., Szengyel, Z., Gaspar, M., Reczey, K., Stalbrand, H., 2007. Heat extraction of corn fiber hemicellulose. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 137, 253–265.
- Berglund B, Lindvall T. Community noise. Center for Sensory Research, Stockholm University and Karolinska Institute. World Health Organization; 1995.
- Bilba K, Arsene MA, Ouensanga A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete Composites* 2003; 25:91–6.



- Bilba K, Arsene MA. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2008; 39:1488–95.
- Biswas, D., Kanti Bose, S., Mozaffar Hossain, M., 2011. Physical and mechanical properties of urea formaldehyde-bonded particleboard made from bamboo waste. *Int. J. Adhes. Adhes.* 31, 84–87.
- Bledzki AK, Fink H-P, Specht K. Unidirectional hemp and flax EP- and PP-composites: influence of defined fiber treatments. *J Appl Polym Sci* 2004; 93:2150–6.
- Brager GS, de Dear RJ. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings* 1998; 27:83–96.
- Browning W, Romm J. Greening the bottom line: increasing productivity through energy efficient design. In: *Second international green buildings conference and exposition*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 1995.
- Cole, R.J., 1998. Emerging trends in building environmental assessment methods. *Building Research and Information* 26 (1), 3–16.
- Cole, R.J., 1999. Building environmental assessment methods: clarifying intentions. *Building Research and Information* 27 (4/5), 230–246.
- Cooper, I., 1999. Which focus for building assessment methods— environmental performance or sustainability? *Building Research and Information* 27 (4/5), 321–331
- Crawley, D., Aho, I., 1999. Building environmental assessment methods: application and development trends. *Building Research and Information* 27 (4/5), 300–308.
- Grace Din K.C. Sustainable construction- The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management* 2008; 86:451–464.
- El-Kassas, A., Mourad, A., 2013. Novel fibers preparation technique for manufacturing of rice straw based fiberboards and their characterization. *Mater. Des.* 50, 757–765.
- El-Sayed Abdo A, Ali MAM, Ismail MR. Natural fibre high-density polyethylene and lead oxide composites for radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry* 2003; 66:185–95.

- El-Tayeb NSM. A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications. *Wear* 2008; 265:223–35.
- Faruk, O., Andrzej K. Bledzka, c, Hans-Peter Finkb, Mohini Saind. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.
- Feliú Vilaclara J.L. (1996). “Látex, su proceso”. *Cauchotecnia* 9: 9-30.
- Fiorelli, J., Curtolo, D.D., Barrero, N.G., Savastano, H., de Jesus Agnolon Pallone, E.M., Johnson, R., 2012. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: an eco-efficient product. *Ind. Crops Products* 40, 69–75.
- Grigoriou, A., Passialis, C., Voulgaridis, E., 2000. Kenaf core and bast fiber chips as raw material in production of one-layer experimental particleboards. *Euro. J. Wood Products* 58, 290–291.
- Halvarsson, S., Edlund, H., Norgren, M., 2008. Properties of medium-density fiberboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin. *Ind. Crops Products* 28, 37–46.
- Halvarsson, S.r., Edlund, H., Norgren, M., 2009. Manufacture of high-performance rice-straw fiberboards. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49, 1428–1435.
- Heerwagen J, Zagreus L. The human factors of sustainable building design: post occupancy evaluation of the Phillip Merrill environmental center, Annapolis, MD, 2005.
- Hodzic A, Coakley R, Curro R, Berndt CC, Shanks RA. Design and optimization of biopolyester bagasse fiber composites. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 2007; 1:46–55.
- Holmes, J., Hudson, G., 2000. An evaluation of the objectives of the BREEAM scheme for offices: a local case study. In: *Proceedings of Cutting Edge 2000*, RICS Research Foundation, RICS, London.
- Johnson, S., 1993. *Greener Buildings: Environmental Impact of Property*. MacMillan, Basingstoke.
- Krogell, J., Korotkova, E., Eranen, K., Pranovich, A., Salmi, T., Murzin, D., Willfor, S., 2013. Intensification of hemicellulose hot-water extraction from spruce wood in a

- batch extractor—effects of wood particle size. *Bioresour. Technol.* 143, 212–220.
- Kuruvilla J, Sabu Th, Pavithran C. Effect of ageing on the physical and mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polyethylene composites. *Compos Sci Technol* 1995; 53(1):99.
  - Liu, S., 2010. Woody biomass: Niche position as a source of sustainable renewable chemicals and energy and kinetics of hot-water extraction/hydrolysis. *Biotechnol. Adv.* 28 (5), 563–582.
  - Liu, S., Lu, H., Hu, R., Shupe, A., Lin, L., Liang, B., 2012. A sustainable woody biomass biorefinery. *Biotechnol. Adv.* 30 (4), 785–810.
  - Lee S, Wang S. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Compos Part A: Appl Sci Manufact* 2006; 37:80–91.
  - Luz SM, Goncalves AR, Del'Arco Jr AP. Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fibers reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2007; 38:1455–61.
  - Luz SM, Caldeira-Pires A, Ferrão PMC. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: ecodesign and LCA as strategy for automotive components. *Resources, Conservation and Recycling* 2010; 54:1135–44.
  - Martin-Sampedro, R., Eugenio, M.E., Moreno, J.A., Revilla, E., Villar, J.C., 2014. Integration of a kraft pulping mill into a forest biorefinery: pre-extraction of hemicellulose by steam explosion versus steam treatment. *Bioresour. Technol.* 153, 236–244.
  - Menzies D, Pasztor J, Nunes F, Leduc J, Chan C-H. Effect of new ventilation system on health and well-being of office workers. *Archives of Environmental health* 1997; 52(5):360–8.
  - Mwaikambo LY, Ansell MP. Hemp fibre reinforced cashew nut shell liquid composites. *Compos Sci Technol* 2003; 63:1297–305.
  - Nadali E, Karimi A, Tajvidi M, Naghdi R. Natural durability of a bagasse fiber/polypropylene composite exposed to rainbow fungus (*Coriolus versicolor*). *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2010; 29:1028–37.
  - Netravali AN, Chabba S. Composites get greener. *Mater Today* 2003:22–9.

- Nishino T, Hirao K, Kotera M, Nakamae K, Inagaki H. Kenaf reinforced biodegradable composite. *Compos Sci Technol* 2003; 63:1281–6.
- NMX-AA-015-1985. Protección al ambiente – contaminación del suelo – residuos sólidos municipales – muestreo – método de cuarto.
- Oksman K et al. Natural fibers as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Compos Sci Technol* 2003; 63:1317–24.
- Okuda, N., Sato, M., 2004. Manufacture and mechanical properties of binderless boards from kenaf core. *J. Wood Sci.* 50, 53–61.
- Paridah, M., AW, N.H., Zaidon, A., Azmi, I., MY, M.N., MY, N.Y., 2009. Bonding properties and performance of multi-layered kenaf board. *J. Trop. Forest Sci.* 21, 113–122.
- Passchier-Vermeer W, Passchier WF. Noise exposure and public health. *Environ Health Perspect* 2000; 108(Suppl. 1):123.
- Preller L, Zweers T, Brunekreef B, Bolej JSM. Sick leave due to work related health complaints among office workers in the Netherlands. In: *Indoor Air '90*, Toronto, 1990.
- Rees, W., 1999. The built environment and the ecosphere: a global perspective. *Building Research and Information* 27 (4), 206–220.
- Rong MZ, Zhang MQ. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal reinforced epoxy composites. *Compos Sci Technol* 2001; 61:1437–47.
- Sabiha-Hanim, S., Mohd Noor, M.A., Rosma, A., 2015. Fractionation of oil palm frond hemicelluloses by water or alkaline impregnation and steam explosion. *Carbohydr. Polym.* 115, 533–539.
- Stamboulis A, Baillie C. Environmental durability of flax fibres and their composites based on polypropylene matrix. *Appl Compos Mater* 2000; 7(5):273–94.
- Sun, S.-L., Wen, J.-L., Ma, M.-G., Sun, R.-C., 2013. Successive alkali extraction and structural characterization of hemicelluloses from sweet sorghum stem. *Carbohydr. Polym.* 92 (2), 2224–2231.

- Van de Weyenberg I, Truong Chi T, Vangrimde B, Verpoest I. Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment. *Compos Part A: Appl Sci Manufact* 2005.
- Walton, S., Heiningen, A.v., Walsum, P.v., 2010. Inhibition effects on fermentation of hardwood extracted hemicelluloses by acetic acid and sodium. *Bioresour. Technol.* 101 (6), 1935–1940.
- Wambua P, Ivens J, Verpoest I. Natural fibres: can they replace glass fibre reinforced plastics?. *Compos Sci Technol* 2003; 63:1259–64.
- Wang, K., Yang, H., Yao, X., Xu, F., Sun, R.-C., 2012. Structural transformation of hemicelluloses and lignin from triploid poplar during acid-pretreatment based biorefinery process. *Bioresour. Technol.* 116, 99–106.
- Wittig W. *Kunststoffe im Automobilbau*. Düsseldorf: VDI-Verlag; 1994.
- Xu Y, Wu Q, Lei Y, Yao F. Creep behavior of bagasse fiber reinforced polymer composites. *Bioresource Technology* 2010; 101:3280–6.
- Young, J.W.S., 1997. A framework for the ultimate environment index— putting atmospheric change into context with sustainability. *Environmental Monitoring and Assessment* 46, 135–149.