



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

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

**MAESTRÍA EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES  
(INGENIERÍA)**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y TERMOFÍSICA DE TEJAS  
HECHAS CON CEMENTO PORTLAND COMPUESTO Y FIBRAS DE  
BAGAZO DE *Agave angustifolia* Haw**

**TESIS**

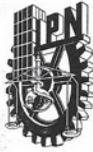
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:  
ING. ANDY ALFONSO OLIVERA**

**DIRECTORES DE TESIS:  
DR. MAGALENO CABALLERO CABALLERO  
DR. RAFAEL ALAVÉZ RAMÍREZ**

**SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAXACA, ENERO 2017**





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

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 10:00 horas del día 19 del mes de Diciembre 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:  
"Caracterización mecánica y termofísica de tejas hechas con cemento Portland compuesto y fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw"

Presentada por el alumno:

OLIVERA  
Apellido paterno  
Nombre(s) ANDY ALFONSO

Apellido materno

Con registro: 

B	1	5	0	5	1	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

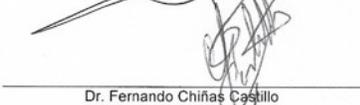
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISIÓN REVISORA**

Directores de tesis

  
Dr. Magdaleño Caballero Gaballero

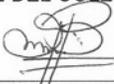
  
Dr. Rafael Alavéz Ramírez

  
Dr. Fernando Chifas Castillo

  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

  
Dr. Francisco Castellanos León

**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**

  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



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

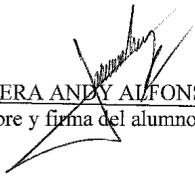


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 09 del mes de enero del año 2018, el (la) que suscribe OLIVERA ANDY ALFONSO alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES, con número de registro B150518, 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. Magdaleno Caballero Caballero y Rafael Alavéz Ramírez** y cede los derechos del trabajo titulado **“Caracterización mecánica y termofísica de tejas hechas con cemento Portland compuesto, y fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw”**, 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 [posgradoox@hotmail.com](mailto:posgradoox@hotmail.com) ó [andy.oliverarivas@gmail.com](mailto:andy.oliverarivas@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
OLIVERA ANDY ALFONSO  
Nombre y firma del alumno(a)



*DEDICATORIA*

***A Dios:***

*Por la vida y bendiciones  
que me ha dado día a día.*

***A mis padres:***

*Por todo el amor, apoyo y consejos  
que me brindan a diario.*

***A mis hermanos Jeffery y Jerry:***

*Por sus ánimos y por estar siempre conmigo.*

## AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional (IPN)** por haberme brindado las facilidades para la elaboración de tesis “Caracterización mecánica y termofísica de tejas hechas con cemento Portland compuesto y fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw” y la beca tesis de posgrado otorgada.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico que me brindó para realizar mis estudios de maestría.

A la **Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI)** por la beca otorgada a través de la participación en los proyectos de investigación del Dr. Magdaleno Caballero Caballero.

Al **Centro Nacional de Metrología (CENAM)** por permitirme realizar la parte experimental en este trabajo.

Al **Dr. Magdaleno Caballero Caballero** y **Dr. Rafael Alavez Ramírez** por la asesoría, apoyo, guía, paciencia y confianza que me brindaron durante la maestría.

Al **Dr. Leonel Lira Cortés** y **M.C. Saúl García Duarte** por la asesoría, guía, apoyo y amistad que me brindaron durante mi estancia.

A los profesores **Dr. Miguel Chávez Gutiérrez, M.C. Margarito Ortiz Guzmán, M.C. José Luis Montes Bernabé, Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Dr. Francisco Castellanos León, Dr. Pedro Montes García, Dr. Sadoth Sandoval Torres, Dr. Fidel Diego Nava, M.C. José Navarro Antonio, M.C. Frank Manuel León Martínez, Dr. Fernando Chiñas Castillo, Dr. Rafael Felipe del Castillo Sánchez y M.C. Sonia Trujillo Argueta** por el apoyo, consejos y amistad que me brindaron durante la maestría.

A mi familia porque en todo momento me apoyaron, creyeron y confiaron en mí, en especial a mis **padres** por el sacrificio que hicieron para que pudiera estudiar la maestría.

A Bárbara por su amor y confianza que ha depositado en mí.

A mis compañeros por su amistad, alegría, paciencia, apoyo y comprensión que tuvieron conmigo.

## RESUMEN

El bagazo de agave es un material residual que se obtiene de la producción del mezcal, y su acumulación y falta de tratamiento derivan problemas ambientales en las comunidades que la producen. El presente trabajo propone como estrategia de aprovechamiento la creación de un material biocompuesto hecho con Cemento Portland Compuesto (CPC) reforzado con Fibras de Bagazo de Agave (FBA). Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, conductividad térmica y resistencia a la flexión. Los materiales compuestos con las concentraciones de fibras 1:0:1 y 1:0:2 (CPC: TX: FBA) tuvieron las menores resistencias a la compresión de 6.19 y 2.34 MPa a los 28 días respectivamente, pero solo la proporción 1:0:1 cumple con lo requerido por la norma ASTM C 270 – 07. También los materiales compuestos con las mayores concentraciones de fibras obtuvieron las menores densidades de 1366.73 y 1297.71 kg/m<sup>3</sup> a los 28 días respectivamente. Los especímenes 1:0:1 y 1:0:2 mostraron los valores más bajos para la conductividad térmica de 0.166 y 0.115 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> respectivamente. En la resistencia a la flexión de las tejas 1:0:1, se observaron valores bajos de 0.73 MPa con una carga máxima de 112.3 N. La proporción óptima de materiales fue de 1:0:1 (CPC: TX: FBA), con resistencia a la compresión de 6.19 MPa a 28 días, densidad de 1366.73 kg/m<sup>3</sup>, conductividad térmica de 0.166 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, resistencia a la flexión de 0.73 MPa y carga máxima de 112.3 N. Los resultados indican que el aumento en la proporción de fibras de bagazo disminuye la resistencia a la compresión y flexión, densidad, conductividad térmica y carga máxima del material biocompuesto. El material final actúa como mortero ligero y aislante.

## ABSTRACT

Agave bagasse is a residual material obtained from the production of mezcal, and their accumulation and lack of treatment resulting from environmental problems in communities that produces it. The present work proposes as a utilization strategy the creation of a biocomposite material made with Portland Composite Cement (CPC) and Tepexil (TX), reinforced with Agave Bagasse Fibers (FBA). Composite materials with fiber concentrations 1: 0: 1 and 1: 0: 2 (CPC: TX: FBA) had the lowest compression strengths of 6.19 and 2.34 MPa at 28 days respectively, but only the proportion 1: 0: 1 complies with the requirements of ASTM C 270 - 07. Also, the composite materials with the highest concentrations of fibers obtained the lowest densities of 1366.73 and 1297.71 kg/m<sup>3</sup> at 28 days respectively. Specimens 1: 0: 1 and 1: 0: 2 (CPC: TX: FBA) showed the lowest values for thermal conductivity of 0.166 and 0.115 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> respectively. In the flexural strength of tiles 1: 0: 1, low values of 0.73 MPa were observed with a maximum load of 112.3 N. The optimum proportion of materials was 1: 0: 1 (CPC: TX: FBA), with compressive strength of 6.19 MPa at 28 days, density of 1366.73 kg/m<sup>3</sup>, thermal conductivity of 0.166 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, flexural strength of 0.73 MPa and of maximum load of 112.3 N. The results indicate that the increase in the proportion of bagasse fibers decreases the compressive and flexural strength, density, thermal conductivity and maximum load of the biocomposite material. The final material acts as a lightweight and insulating mortar.

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xiii
NOMENCLATURA .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	xv
PROBLEMÁTICA .....	xvii
JUSTIFICACIÓN.....	xix
HIPÓTESIS .....	xx
OBJETIVOS .....	xxi
GENERAL .....	xxi
ESPECÍFICOS .....	xxi
CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO .....	4
2.1. FIBRAS DE <i>Agave Angustifolia</i> HAW .....	4
2.2. MATERIALES COMPUESTOS .....	5
2.3. CEMENTO PORTLAND.....	5
2.3.1. TIPOS DE CEMENTO .....	5
2.3.2. COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS .....	6
2.4. TEPEXIL.....	7
2.5. CONCEPTO DE ESFUERZO .....	8
2.5.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	9
2.5.1. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	11
2.6. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	11
2.6.1. AISLAMIENTO TÉRMICO .....	13
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	14

---

<b>3.1. METODOLOGÍA DE LA FASE I .....</b>	<b>15</b>
3.1.1. Acondicionamiento de fibras.....	15
3.1.2. Tratamiento de fibras.....	16
3.1.2. Espectroscopía de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR).....	16
<b>3.2. METODOLOGÍA DE LA FASE II .....</b>	<b>17</b>
3.2.1. Elaboración del material biocompuesto .....	17
3.2.2. Prueba de resistencia a la compresión.....	20
3.2.3. Prueba de conductividad térmica .....	21
<b>3.3. METODOLOGÍA DE LA FASE III .....</b>	<b>26</b>
3.3.1. Elaboración de tejas con el material caracterizado .....	26
3.3.2. Prueba de resistencia a la flexión .....	27
<b>3.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>29</b>
Diseño del experimento .....	29
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
4.1. Resultados de la fase I.....	31
4.2. Resultados de la fase II.....	34
4.2.1. Efecto de la proporción de fibras y la resistencia a la compresión .....	34
4.2.2. Efecto de la proporción de fibras y la conductividad térmica .....	37
4.3. Resultados de la fase III.....	47
4.3.1. Elaboración de tejas.....	47
5.3.1. Efecto de la proporción de fibras y la resistencia a la flexión .....	48
<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>51</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCIA .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización física y química de las fibras.....	4
Tabla 2. Tipos de cemento.....	6
Tabla 3. Composición de los diferentes tipos de cemento.....	7
Tabla 4. Especificación de propiedades requeridas.....	10
Tabla 5. Guía para la selección de la mampostería de morteros.....	10
Tabla 6. Composición estándar del cemento Portland Compuesto IMPERCEM..	17
Tabla 7. Composición química del tepexil.....	18
Tabla 8. Diseño experimental.....	29
Tabla 9. Códigos de cubos.....	30
Tabla 10. Resistencia a la compresión.....	36
Tabla 11. Resultados del material de arcilla cerámica.....	38
Tabla 12. Resultados del material 1:1:0 (CPC:TX:FBA).....	39
Tabla 13. Resultados del material 1:0:1 (CPC:TX:FBA).....	40
Tabla 14. Resultados del material 1:0:2 (CPC:TX:FBA).....	41
Tabla 15. Resumen de conductividades térmicas .....	46
Tabla 16. Resistencia a la flexión.....	48
Tabla 17. Propiedades de materiales.....	51
Tabla 18. Comparación de resistencia a la flexión.....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Temperatura máxima promedio mensual (°C) mayo 2016.....	xvii
Figura 2. Tepexil.....	8
Figura 3. Esfuerzo en un elemento con área transversal $A$ sometido a una carga axial $P$ .....	9
Figura 4. Escala de conductividad térmica para diversos estados de la materia a temperatura y presión normales.....	12
Figura 5. Diagrama de la metodología.....	14
Figura 6. Molino de martillos.....	15
Figura 7. Molino de cuchillas.....	15
Figura 8. Fibras en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hidratada.....	16
Figura 9. Espectrofotómetro.....	17
Figura 10. ROTAP.....	18
Figura 11. Mezcla seca.....	19
Figura 12. Mezcla hidratada.....	19
Figura 13. Curación de cubos.....	19
Figura 14. Prensa.....	20
Figura 15. Prensa manual.....	20
Figura 16. Molde metálico para especímenes.....	21
Figura 17. Medición de espesores .....	22
Figura 18. Horneado de muestras.....	22
Figura 19. Cubierta plástica .....	22
Figura 20. Colocación de muestras en conductivímetro térmico.....	23
Figura 21. Esquema del aparato de placa caliente con guarda.....	24
Figura 22. Mediciones del aparato de placa caliente con guarda.....	25
Figura 23. Equipo de medición de conductividad térmica.....	25
Figura 24. Vista de tejas .....	26
Figura 25. Molde metálico de tejas.....	27

Figura 26. Lectura de dimensiones.....	28
Figura 27. Lectura de peso.....	28
Figura 28. Resistencia a la flexión de 3 puntos.....	28
Figura 29. Fibras de tamaño de 6 mm.....	31
Figura 30. Estructura química parcial de la lignina.....	32
Figura 31. Espectro FTIR de las fibras sin tratamiento (línea negra) y fibras tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (línea roja).....	33
Figura 32. Comparación de espectros FTIR de las fibras sin tratamiento (línea negra) y fibras tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (línea roja).....	34
Figura 33. Tejas a)1:1:0 b)1:0:1 c)1:0:2 d) arcilla cerámica.....	48
Figura 34. Teja 1:0:2 (CPC:TX:FBA).....	49
Figura 35. Teja sin refuerzo.....	50
Figura 36. Teja con refuerzo.....	50

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Comparación gráfica de densidades obtenidas.....	36
Gráfica 2. Comparación gráfica de resistencias a la compresión obtenidas.....	37
Gráfica 3. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra de arcilla cerámica.....	42
Gráfica 4. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra 1:1:0 (CPC: TX: FBA).....	42
Gráfica 5. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra 1:0:1 (CPC: TX: FBA) .....	43
Gráfica 6. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra 1:0:2 (CPC: TX: FBA) .....	43
Gráfica 7. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra de arcilla cerámica.....	44
Gráfica 8. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra 1:1:0 (CPC: TX: FBA) .....	44
Gráfica 9. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra 1:0:1 (CPC: TX: FBA) .....	45
Gráfica 10. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra 1:0:2 (CPC: TX: FBA) .....	45
Gráfica 11. Comparación gráfica de las resistencias a la flexión obtenidas.....	49
Gráfica 12. Comparación gráfica de cargas máximas obtenidas.....	50

## **NOMENCLATURA**

### *ABREVIATURAS:*

APCG	Aparato de Placa Caliente con Guarda
CENAM	Centro Nacional de Metrología
FTIR	Espectroscopía de Infrarrojo por Transformadas de Fourier
FST	Fibras Sin Tratamiento
FT	Fibras Tratadas
FBA	Fibras de bagazo de agave
TX	Tepexil
CPC	Cemento Portland Compuesto
a/c	Agua/ cemento

### *COMPUESTOS:*

Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Calcio
---------------------	---------------------

### *NORMATIVIDAD:*

ASTM	American Society for Testing and Materials
NMX	Norma Mexicana
ONNCCE	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación
DIN	Instituto de Normalización Alemán
UNE	Una Norma Española
ISO	International Organization for Standardization

### *SIMBOLOGÍA:*

f <sub>c</sub>	Resistencia a la compresión
$\lambda$	Conductividad térmica
MPa	Megapascales
N	Newton

## INTRODUCCIÓN

La producción de mezcal industrial y artesanal es una de las actividades económicas más representativas e importantes en México, y sus productos comerciales son reconocidos a nivel mundial con más de 500 marcas en el mercado. En el año 2016, se obtuvieron 3,028,000 L de mezcal a nivel nacional, y en Oaxaca fue el mayor productor con 83.5% del total, con al menos 450 productores en el estado (CRM, 2017). Es necesario entonces tomar en cuenta que toda esta producción también conduce a la generación de una cantidad importante de residuos, entre los que se encuentra el bagazo del mezcal, material de desperdicio que origina anualmente 4,807,285 ton (Gutiérrez *et al.*, 2012). Este residuo está compuesto mayoritariamente por fibras lignocelulósicas, el cual lo hace un material de baja densidad y conductividad térmica.

Es un esfuerzo por aprovechar integralmente el agave, el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca del IPN, ha realizado investigaciones sobre la caracterización mecánica de las fibras de agave (Cortés, 2009), adobes reforzados con estas fibras (Montes Bernabé, 2009), corchos (Silva-Perez, 2015) y envases para frutos de papaya (Hidalgo-Reyes, 2015).

La selección de materiales para la construcción de viviendas es muy importante, debido a que deben considerar las condiciones climáticas de la región. Para los techos de viviendas, los materiales aislantes representan la mejor opción debido al confort térmico que brindan. En el estado de Oaxaca, y dependiendo de la altitud del lugar, se observa un cambio en las temperaturas promedios del medio ambiente. En las regiones calurosas se alcanzan temperaturas anuales promedios superiores a 30°C. Las pocas viviendas que existen fueron construidas con materiales endebles y no aptos al contexto climático local, por lo cual es importante desarrollar y elaborar un material que brinde el confort térmico adecuado con una buena estabilidad mecánica.

El presente tema de tesis “Caracterización mecánica y termofísica de tejas hechas con cemento Portland compuesto y fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw”, es otra aplicación de fibras para el aprovechamiento integral del agave. El objetivo del presente proyecto fue elaborar, con diferentes formulaciones de Cemento Portland Compuesto (CPC) y Tepexil (TX) y Fibras de Bagazo de Agave (FBA) como refuerzo, un material aislante con buena resistencia a la compresión y flexión, en forma de teja para brindar confort térmico en viviendas.

## PROBLEMÁTICA

En los últimos 10 años, el estado de Oaxaca ha experimentado un aumento en las temperaturas medias del medio ambiente. Como se observa en la Figura 1, las temperaturas máximas promedio registrada en el mes de mayo fluctuaron entre 30 y 40 °C (CONAGUA, 2016), generando ondas de calor que afectan la salud de las personas. Los malestares más comunes son mareos, dolor de cabeza, fatiga, debilidad, irritabilidad, bajo rendimiento físico y alteración del comportamiento (Castañeda-Nolasco & Vecchia, 2007).

Las familias en estado de pobreza y pobreza extrema, que representan un 66.8% de la población en México (CONEVAL, 2014), experimentan directamente los estragos de las variaciones en la temperatura atmosférica debido principalmente a las condiciones de las casas que habitan, construidas con materiales endebles: láminas de cartón, láminas galvanizadas, lonas, material de reciclaje u otros materiales, que pueden provocar estrés térmico. Sin embargo, el uso de ventiladores, climatizadores o aire acondicionado tiene un costo muy alto debido no sólo a los precios de los productores, sino también al consumo energético.

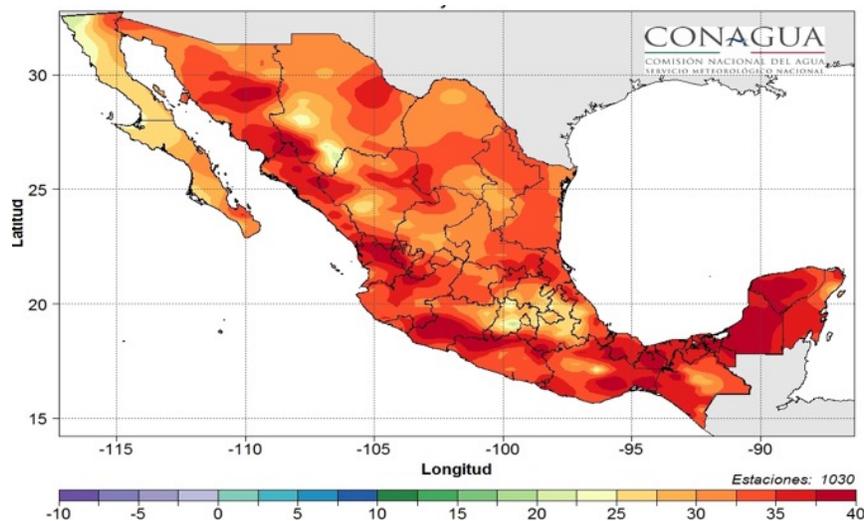


Figura 1. Temperatura máxima promedio mensual (°C) mayo 2016. Fuente Servicio meteorológico nacional

El estado de Oaxaca produce una enorme cantidad de bagazo de *Agave angustifolia* Haw, sin embargo, en la actualidad no existen estudios sobre la utilidad industrial de este residuo. Se propone entonces el aprovechamiento del material, específicamente de las fibras lignocelulósicas que representan el 3.1% por tonelada (Cortés, 2009), para la creación de nuevos materiales para construcción, como tejas para techos de vivienda, capaces de amortiguar el calentamiento térmico y brindar condiciones de habitación más adecuadas para la población de bajos recursos.

En general, los residuos de la industria mezcalera se vierten en ríos, arroyos y campos abiertos por falta de espacios y procesos de reciclaje (Cortés, 2009), lo que causa problemas ambientales graves para las poblaciones cercanas (Gutiérrez et al., 2012): contaminación de los suelos y acuíferos, y emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero (Gómez, 2014).

## JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, se han utilizado fibras vegetales para desarrollar materiales de construcción por sus ventajas técnicas, económicas y ambientales (Aguilar *et al.*, 2005 ; Khedari *et al.*, 2001; Asasutjarit *et al.*, 2007; Khedari, Watsanasathaporn & Hirunlabh, 2005; Tolêdo Filho *et al.*, 2003; Tolêdo Filho *et al.*, 2009; Ramakrishna, Sundararajan & kothandaraman, 2010). Sin embargo, en la literatura no existen investigaciones sobre la elaboración de materiales reforzados o elaborados con fibras de agave.

Considerando que el *Agave angustifolia* Haw, conocido también como maguey espadín, es la especie comúnmente utilizada en la elaboración del mezcal (CRM, 2016), y, por lo tanto, aquella que produce más residuos, se pretende elaborar tejas para vivienda con fibras de agave y utilizarlo como un material aislante, con el objetivo de ofrecer una opción sustentable en el área de la construcción.

Pueden realizarse diferentes formulaciones de CPC y TX en combinación con FBA para obtener un biocompuesto en forma de teja. Los beneficios de este nuevo concepto son viviendas térmicamente confortables, mayor cuidado al medio ambiente, valor agregado a un residuo, reducción del uso de medios mecánicos y ahorro energético (Al-Homoud, 2005).

## **HIPÓTESIS**

Las tejas elaboradas con un material biocompuesto (cemento portland compuesto y reforzado con fibras de agave) tendrán un balance adecuado de sus propiedades mecánicas y térmicas; ventajas que les permitirán ser utilizadas en viviendas de bajo costo.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Fabricar un material biocompuesto reforzado con fibras de agave para techos de vivienda en forma de teja, capaz de brindar confort térmico en viviendas de bajo costo.

### **ESPECÍFICOS**

1. Acondicionar las fibras de bagazo de agave.
2. Determinar la resistencia a la compresión de acuerdo con la norma ASTM C 109/C 109M – 05 del material biocompuesto obtenido.
3. Determinar la conductividad térmica del material biocompuesto obtenido con base en la norma NOM-018-ENER-1997.
4. Diseñar y construir tejas con el material que presente el mejor balance en sus propiedades.
5. Determinar la resistencia a la flexión de tejas de acuerdo con la norma ASTM C 1492-03.

## **CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES**

Los materiales compuestos son de gran importancia en la ciencia y tecnología de los materiales, ya que brindan propiedades físicas y mecánicas distintas a las de sus componentes individuales. Los materiales compuestos tienen grandes aportaciones en la historia. En 1942, por primera vez se utilizó plástico reforzado con fibra de vidrio para hacer barcos y dispositivos eléctricos. En el siglo XIX, se empleó barras de hierro al hormigón para fortalecer las mamposterías. A partir de 1970, los materiales compuestos tuvieron gran popularidad en la aeronáutica, sección automotriz, artículos deportivos (Brigante, 2014).

En la actualidad, las fibras naturales tienen un gran auge al ser utilizadas como refuerzo de otros materiales, porque brindan mejoras en las propiedades originales, principalmente, cuando hablamos de propiedades a tensión. Se han reportado trabajos que estudian el efecto reforzante de fibras en materiales compuestos.

Abdullah et al. (2011) obtuvieron un material compuesto de cemento portland reforzado con fibra de coco y arena, el tamaño de la arena fue menor a 2 mm, con una relación agua cemento de 0.55. Se sustituyó la arena por fibra de coco a 3, 6, 9, 12 y 15%. Los resultados al módulo de ruptura y resistencia a la compresión con un 9 % de fibra fueron los más altos con 43.8 MPa a los 28 días.

Por otro lado, Darsana et al. (2016) desarrollaron un material compuesto de cemento, arena y fibras de coco de 25mm. Sustituyeron la arena por fibras a 10 y 15%, con una relación agua/cemento de 0.6, obteniendo resultados a resistencia a la compresión de 40.10 MPa y 60 kg de carga máxima en la resistencia a la flexión con un 10% de sustitución de fibra.

Roma, Martello & Savastano (2008) realizaron una evaluación mecánica, física y térmica de tejas con varias formulaciones de cemento portland puzolánico y humo de sílice, reforzadas con fibras de eucalipto de 0.66 mm y/o sisal de 1.66 mm. Se encontró que los materiales reforzados con fibras de sisal a 28 días tuvieron los mejores resultados en tenacidad y carga máxima de  $1152 \text{ J/m}^2$  y  $1111 \text{ N}$  respectivamente. Observaron también que el tipo de fibras influyen en la absorción de agua, densidad aparente y permeabilidad. Por último, el rendimiento térmico del material reforzado con sisal mostró que son aceptables como sustitutos de láminas de fibrocemento.

Se han realizado muchos estudios sobre las propiedades mecánicas en materiales compuestos de cemento, arena y agua, reforzados con fibras (Morrissey et al., 1985; Salas et al., 1986; Paramasivam et al., 1984; Bentur & Mindess, 2006; de Andrade Silva et al., 2010; Ramaswamy et al., 1983; Tonoli et al., 2007), sin embargo, hay poca literatura respecto al estudio de las propiedades térmicas.

Khedari et al. (2001), estudiaron el efecto de diferentes proporciones de fibras de coco/durian como refuerzos de un mortero con cemento portland ordinario y arena. Encontraron que la conductividad térmica disminuye cuando aumenta la cantidad de fibras y que la eficiencia del aislamiento térmico del material es opuesta a la densidad. En las propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión disminuye con el aumento de la cantidad de fibras. El mejor balance de sus propiedades térmicas y mecánicas de estos materiales fue cuando se presentó 20% de fibras de coco y 10% de fibras de durian. Para ambos especímenes la óptima longitud de fibra fue de 2 mm. Los especímenes reforzados con coco tuvieron conductividad térmica de  $0.2543 \text{ W/mK}$ , una resistencia a la compresión de  $2.4 \text{ MPa}$  a los 10 días y una densidad aparente de  $958 \text{ kg/m}^3$ . Los especímenes reforzados con fibras de durian tuvieron una

conductividad térmica de 0.3506 W/mK, resistencia a la compresión de 3.3 MPa y una densidad aparente de 1456 kg/m<sup>3</sup>.

Onésippe et al. (2010) relacionaron la densidad y la porosidad de materiales basados de cemento con fibras vegetales con su conductividad térmica, concluyendo que la conductividad térmica es inversamente proporcional a los huecos en los materiales compuestos, además, que las propiedades de aislamiento térmico se mejoran cuando la densidad disminuye.

## CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

### 2.1. FIBRAS DE *Agave Angustifolia* HAW

El *Agave angustifolia* Haw es una planta constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, de la cual pueden obtenerse fibras lignocelulósicas, cuyas características físico-químicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización física y química de las fibras

Parámetro	Resultado
Densidad	414.7 kg/m <sup>3</sup>
Diámetro del haz fibroso	501 µm
Longitud del haz fibroso	144 mm
Contenido de humedad	7.78 ± 0.37 %
Solubilidad en agua fría	2.66 ± 0.12 %
Solubilidad en agua caliente	4.39 ± 0.32 %
Solubilidad en NaOH al 1%	20.22 ± 0.27 %
Extractivos en etanol/tolueno	1.54 ± 0.11 %
Extractivos totales	5.30 ± 0.40 %
Lignina Klason	17.91 ± 1.02 %
Lignina soluble	2.78 ± 0.35 %
Lignina total	20.69 ± 0.97 %
Holocelulosa	82.12 ± 0.49 %
Celulosa	48.04 ± 1.36 %
Hemicelulosa	34.08 ± 1.03 %
α-Celulosa	55.03 ± 0.33 %
Contenido de cenizas	1.28 ± 0.06 %

Fuente: Hidalgo-Reyes (2015)

## **2.2. MATERIALES COMPUESTOS**

Los materiales compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para dar una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. La matriz de un material compuesto soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta; transfiere la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso; además, evita la propagación de grietas en las fibras a todo lo largo del compuesto. Los compuestos consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mayor rigidez y una mejor resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite el esfuerzo mecánico a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. Un compuesto reforzado con fibras debe tomar en consideración muchos factores como longitud, diámetro, orientación, cantidad, propiedades de las fibras y de la matriz, y la unión entre fibras y matriz (Askeland & Phulé, 1998).

## **2.3. CEMENTO PORTLAND**

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente silicatos tricálcicos (alita) y dicálcicos (belita), aluminatos tricálcicos (celita) y ferroaluminatos tetracálcicos (belita clara). Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua, conocida como hidratación. El cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada y machacada, pedrejón y otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (Kosmatka, Panarese & Bringas, 1992).

### **2.3.1. TIPOS DE CEMENTO**

Los cementos mexicanos se especifican según la norma NMX-C-414-ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y

---

Edificación). De acuerdo con esta norma, hay seis tipos básicos de cementos, que se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de cemento

<b>Tipo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Descripción</b>
CPO	Cemento Portland ordinario	Cemento producido a base de la molienda de clínker Portland y usualmente, sulfato de calcio.
CPP	Cemento Portland puzolánico	Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, materiales puzolánicos y usualmente, sulfato de calcio.
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, escoria de alto horno y usualmente sulfato de calcio.
CPC	Cemento Portland compuesto	Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En este caso la caliza, puede ser el único componente.
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland, humo de sílice y usualmente sulfato de calcio.
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker Portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE

### 2.3.2. COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS

En la tabla 3 se muestran las composiciones de los tipos de cemento según la norma NMX-C-414-ONNCCE.

Tabla 3. Composición de los diferentes tipos de cemento

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					
		Clínker		Principales			
		Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos*	Humo de sílice	Caliza	Minoritarios**
CPO	Cemento Portland ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Portland puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPE G	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Portland compuesto***	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	20-39	61-80	-	-	-	0-5

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE

\*Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

\*\*Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.

\*\*\*El cemento Portland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede estar en forma individual en conjunto con clínker+yeso.

## 2.4. TEPEXIL

Es una piedra volcánica ígnea porosa, grisácea o blanuzca, frágil y de baja densidad (Figura 2); está compuesta principalmente por cuarzo y silicatos. El tepexil se utiliza como abrasivo (en bloque o en polvo) y como material ligero para

la construcción (Osindky & Stellman, 2000). El tepexil se ha usado en cementos para la creación de concretos livianos por su baja densidad.



Figura 2. Tepexil

## 2.5. CONCEPTO DE ESFUERZO

Esfuerzo es la fuerza por unidad de área o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada y se representa con la letra griega  $\sigma$  (sigma). El esfuerzo en un elemento con área transversal  $A$  sometido a una carga axial  $P$  (Figura 4) se obtiene, por lo tanto, al dividir la magnitud  $P$  de la carga entre el área  $A$ :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

ec. (1)

Se empleará un signo positivo para indicar un esfuerzo de tensión (el elemento a tensión) y un signo negativo para indicar un esfuerzo compresivo (el elemento a compresión) (Beer et al., 2004).

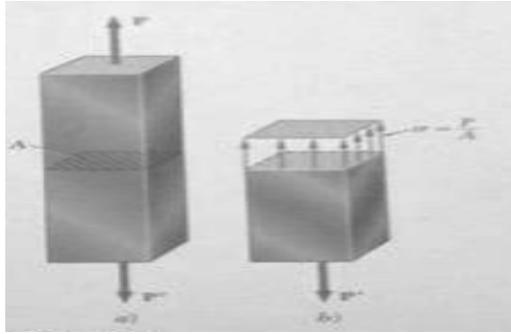


Figura 3. Esfuerzo en un elemento con área transversal  $A$  sometido a una carga axial  $P$

### 2.5.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto y se le designa con el símbolo  $f'_c$ . La resistencia a la compresión se puede expresar en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb}/\text{pulg}^2$  o psi) a una edad de 28 días. Se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia en otras edades. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y la resistencia a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días (Kosmatka, 2004).

Un ensayo de compresión se realiza de forma similar a un ensayo de tracción, excepto que la fuerza es comprensiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. La ecuación 1 se utiliza para calcular el esfuerzo de compresión. Los ensayos de compresión se utilizan cuando se desea conocer el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes (o sea, plásticas), tal como ocurren en los procesos de conformación, o bien cuando tiene un comportamiento frágil a tracción (Callister, 2002).

Los morteros se clasifican en 4 tipos (M, S, N y O) según a su resistencia a la compresión (Tabla 4). Cada tipo de mortero tiene una aplicación recomendada según la norma ASTM C 270 – 07 (Tabla 5). La resistencia a la compresión mínima que se necesita para fabricar tejas son los morteros de tipo O de 2.4 MPa.

Tabla 4. Especificación de propiedades requeridas

		Promedio mínimo de resistencia a la compresión a los 28 días	
		Tipo	psi (MPa)
Mortero		M	2500 (17.2)
		S	1800 (12.4)
		N	750 (5.2)
		O	350 (2.4)

Fuente: ASTM C 270 – 07

Tabla 5. Guía para la selección de la mampostería de morteros

Ubicación	Segmento de construcción	Tipo de mortero	
		recomendado	Alternativo
Exterior, por encima del nivel	Muro con carga	N	S o M
	Muro sin carga	O	N o S
	Parapeto	N	S
Exterior, en o por debajo del nivel	Muro de cimentación, muro de contención, arquetas, alcantarillas, aceras, banquetas y patios	S	M o N
Interior	Muro con carga	N	S o M
	Particiones no portantes	O	N

Fuente: ASTM C 270 – 07

### 2.5.1. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Con el objetivo de conocer cómo influyen en las propiedades mecánicas las fibras incorporadas en las tejas, se realizó la prueba de resistencia a la flexión. De acuerdo a la norma DIN 52362 la resistencia a la flexión (RF) se define como el cociente del momento flexionante (M), producido por la fuerza máxima (FM) aplicada, y el momento de resistencia del material (W).

$$RF = M/W$$

ec. (2)

Dada la delgadez de las tejas cerámicas, que tienen grandes dimensiones de largo y ancho con respecto al espesor, la resistencia a la flexión es indicativa de la resistencia mecánica de las tejas. La resistencia a la flexión es una característica importante que debe incluirse en los criterios de diseño cuando se especifican las tejas cerámicas en función del nivel de rendimiento que se les exige.

### 2.6. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El valor de las propiedades termofísicas es importante para el funcionamiento óptimo de procesos en los que existe intercambio de energía térmica. Estos valores permiten diseñar mejores sistemas y simular con mejor confiabilidad procesos y sistemas para permitir usar eficientemente la energía. Una de las propiedades termofísicas es la conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales y representa su capacidad para conducir calor cuando está sometido a un gradiente de temperatura. La conductividad térmica es una propiedad de transporte, que depende del estado y de la estructura de la materia; atómica y molecular (Cortés et al., 2014).

La ley de Fourier, define la conductividad térmica como:

$$\lambda = -\frac{q_x}{\frac{\partial T}{\partial x}}$$

ec. (3)

Donde:

$\lambda$  es la conductividad térmica

$q_x$  es el flujo de calor por unidad de área en la dirección x

$\frac{\partial T}{\partial x}$  es el gradiente de temperatura en la dirección x.

La medición de la conductividad térmica es muy importante para mejorar la eficiencia energética de sistemas actuales donde ocurran transferencia de calor, dado al universo de materiales y sustancias que se emplean en dichos sistemas (Cortés et al., 2014). En la Figura 3, se muestran en general las conductividades térmicas de diferentes materiales.

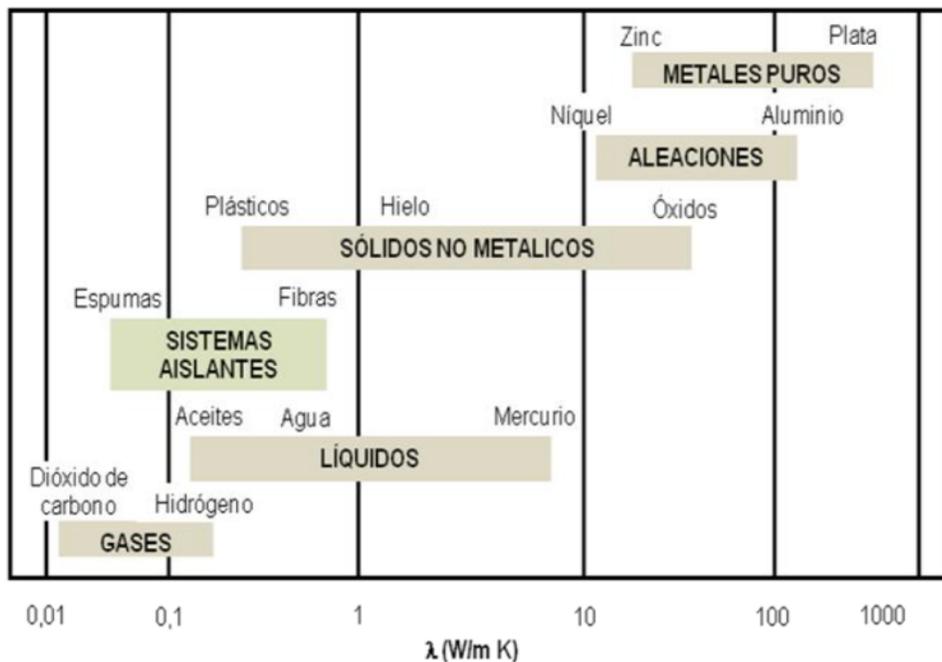


Figura 4. Escala de conductividad térmica para diversos estados de la materia a temperatura y presión normales. Fuente: CENAM

### **2.6.1. AISLAMIENTO TÉRMICO**

El aislamiento térmico es un material o combinación de materiales que su principal función es, con el paso del tiempo, la velocidad del flujo de calor por conducción, convección y radiación, se hace más lento, y el uso de materiales aislantes en una vivienda proporciona un ambiente agradable dentro del hogar (Al-Homoud, 2005). En el Centro Nacional de Metrología (CENAM) se tiene un patrón en los materiales aislantes, el cual se menciona que los materiales son aislantes térmicos cuando la conductividad térmica esté entre  $0.03$  a  $0.17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (Cortés et al., 2010).

### CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

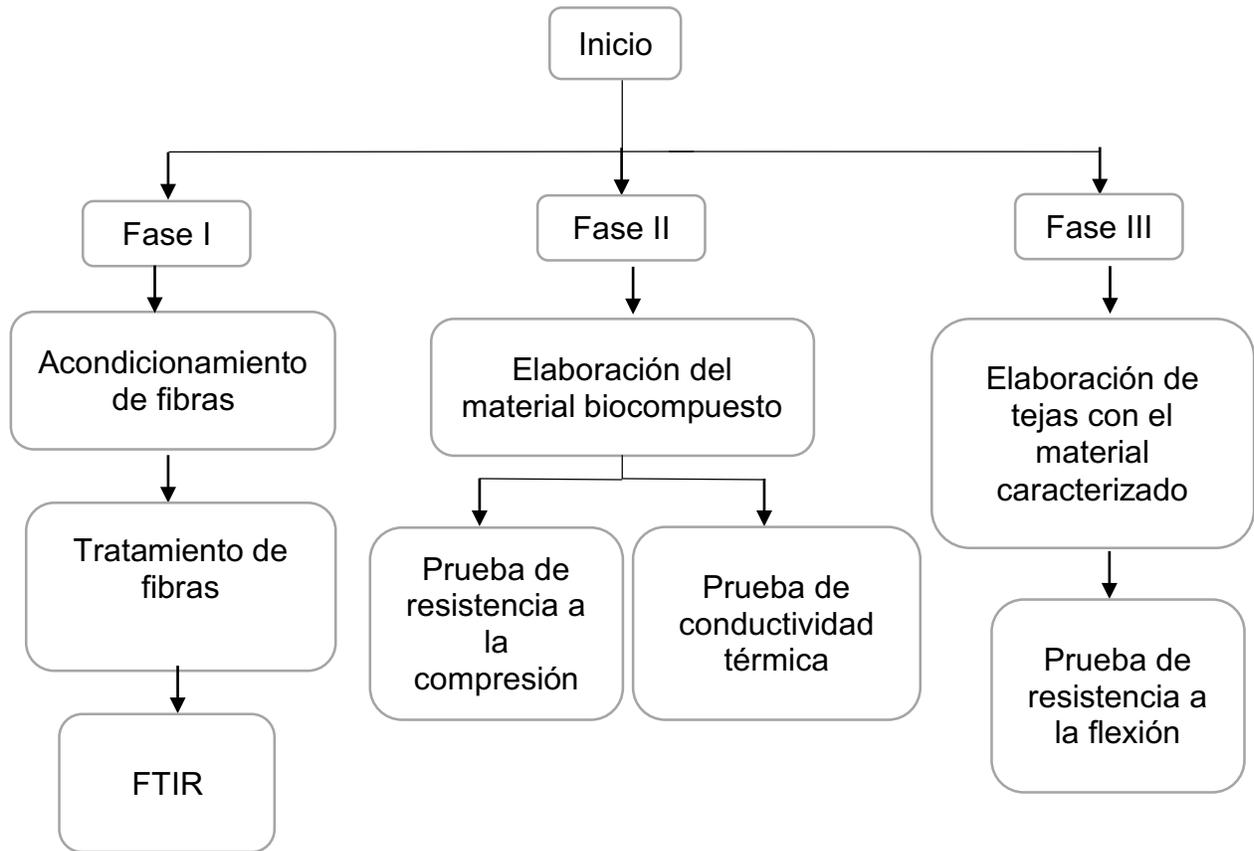


Figura 5. Diagrama de la metodología

### 3.1. METODOLOGÍA DE LA FASE I

El bagazo de agave *angustifolia* Haw fue recolectado en un palenque de Santiago Matatlán, Oaxaca.

#### 3.1.1. Acondicionamiento de fibras

El bagazo fue sumergido totalmente en agua potable durante 24 horas para separar y ablandar la pulpa de las fibras; después se lavó con una hidrolavadora KARCHER Modelo K4 para eliminar la pulpa y azúcares de las fibras y evitar su influencia en las mezclas finales de mortero debido a que los azúcares retardan el fraguado. Las fibras lavadas se secaron durante 12 horas bajo el sol, y una vez eliminada gran parte de la humedad fueron molidas primero con un molino de martillos con tamiz de 1 cm (Figura 6) y después en un molino de cuchillas marca FRITSCH modelo PULVERISETTE 19 UNIVERSAL CUTTING MILL, con tamiz de 1 mm (Figura 7).



Figura 6. Molino de martillos



Figura 7. Molino de cuchillas

### 3.1.2. Tratamiento de fibras

Las fibras molidas fueron sumergidas en su totalidad en una solución acuosa de hidróxido de Calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) al 10% durante 34 horas, con agitación manual cada 8 horas para asegurar la penetración de la solución en el material (Figura 8). El tratamiento fue realizado con el objetivo de eliminar la lignina de las fibras y mejorar la interfaz de las fibras con cemento (Macías, 2014).



Figura 8. Fibras en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hidratada

### 3.1.2. Espectroscopía de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FTIR)

Se analizaron las muestras de fibras de bagazo antes de ser tratadas con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (FST) y después del tratamiento (FT) para comprobar la eliminación de la lignina en el material. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro Termo Scientific modelo NICOLET FT-IR (Figura 9), por ATR, en el rango de 4,000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ .



Figura 9. Espectrofotómetro

### 3.2. METODOLOGÍA DE LA FASE II

Con las fibras acondicionadas, se pasó a la siguiente fase de elaboración del material biocompuesto y las mediciones para la resistencia a la compresión y conductividad térmica.

#### 3.2.1. Elaboración del material biocompuesto

Para este proyecto se utilizó Cemento Portland Compuesto (CPC) IMPERCEM 30R que satisface las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE y su composición química se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición estándar de CPC IMPERCEM 30R

<b>Componente</b>	<b>%Masa</b>
Óxido de calcio	≈ 57.62
Óxido de silicio	≈ 22.03
Óxido de aluminio	≈ 4.74
Óxido de hierro	≈ 2.79
Óxido de magnesio	≈ 1.30
Sulfatos	----
Otros materiales	< 11

Se adquirió Tepexil (TX) proveniente de los bancos del Perote, Veracruz. Se tamizó en las mallas #4, #8 y #16 con un ROTAP modelo RX-29 (Figura 10). Se seleccionó tepexil retenido en la malla #16, debido a que su tamaño de grano es de 1.18 y permite obtener un material con baja densidad.

En la Tabla 7 se observa que el TX es alto en óxido de silicio comparado con el cemento portland ordinario.

Tabla 7. Composición química del tepexil

<b>Componente</b>	<b>%Masa</b>
Óxido de calcio	≈ 1.7
Óxido de silicio	≈ 67.5
Óxido de aluminio	≈ 14.52
Óxido de hierro	≈ 2.41
Óxido de magnesio	≈ 0.44
Sulfatos	----
Otros materiales	< 13

Fuente: Méndez (2008)



Figura 10. ROTAP

Para la elaboración de los biocompositos, el CPC, TX y las FBA fueron mezclados en seco en una batidora marca Hamilton Beach durante 4 minutos para homogeneizar los materiales (Figura 11). Posteriormente, se agregó agua en la batidora con una relación agua/cemento de 0.4 y se mezcló nuevamente durante 4 minutos (Figura 12).



Figura 11. Mezcla seca



Figura 12. Mezcla hidratada

Una vez lista la mezcla, se hicieron cubos de 50 mm con base en la norma ASTM C 109/C 109M – 05 con proporciones de 1:1 CPC: tepexil (Control) y 2 mezclas más sustituyendo el tepexil por fibras de agave en las siguientes formulaciones 1:0:1 y 1:0:2 (CPC: TX: FBA). Después de 24 horas se sumergieron los cubos en una solución acuosa con hidróxido de Calcio en un 3% respecto al peso del agua para su curación (Figura 13).



Figura 13. Curación de cubos

### 3.2.2. Prueba de resistencia a la compresión

Después de preparar y curar los especímenes, se hizo la prueba de resistencia a la compresión con base en la norma ASTM C 109/C 109M – 05. Se ensayó los especímenes a las edades de 7, 14 y 28 días como lo establece la norma. Las máquinas utilizadas para estas pruebas, debido a la capacidad de carga, fueron una prensa de anillos marca GEOTEST, modelo S5830 MULTILoader, aplicándose carga a una velocidad de 1 mm/min (Figura 14) y una prensa manual de 120 ton marca HELICOIO (Figura 15). Para obtener el valor de la resistencia a la compresión se utilizó la siguiente ecuación:

$$f_m = P/A \quad \text{ec. (4)}$$

Donde:

$f_m$  = Resistencia a la compresión en MPa,

$P$  = Carga máxima total en N y

$A$  = Área de la superficie cargada en  $\text{mm}^2$ .



Figura 14. Prensa de anillos



Figura 15. Prensa Manual

### 3.2.3. Prueba de conductividad térmica

Para medir la conductividad térmica, en moldes metálicos, se realizaron especímenes de 16 x 16 x 1.3 cm (Figura 16). Por cada proporción se hicieron 3 repeticiones. Se dejó curar por 28 días los especímenes. También se hicieron especímenes de arcilla cocida, la cual comúnmente están hechas las tejas.



Figura 16. Molde metálico para especímenes.

Se lijaron las muestras hasta tener una mejor planicidad en las superficies y posteriormente se midieron sus espesores con un vernier tomando 3 medidas por lado de los especímenes hasta no tener mucha diferencia en los espesores (Figura 17). Finalmente se tomaron dos muestras con las mejores planicidades para medir su conductividad térmica.



Figura 17. Mediciones de espesor

Las muestras, sin cubierta plástica, se colocaron en un horno durante 7 horas a una temperatura de 70 °C para extraer toda la humedad acumulada en los especímenes, ya que este aumenta la conductividad térmica y su error de medición (Figura 18). Después de las 7 horas en el horno, las muestras se sacaron y se colocó una cubierta plástica para evitar el contacto de la humedad del ambiente (Figura 19).



Figura 18. Horneado de muestras



Figura 19. Cubierta plástica

La primera muestra con cubierta plástica se puso al centro de la placa fría, donde se encuentra el área de medición y la placa caliente. Alrededor de la muestra se puso poliestireno y fibras de vidrio para evitar la pérdida de calor de la muestra y

que sea un valor más preciso. Después se colocó la placa caliente con guarda encima de la muestra. Posteriormente se puso la otra muestra con cubierta plástica encima de la placa caliente con su poliestireno alrededor. Al final, se colocó la segunda placa fría arriba de la muestra (Figura 20).

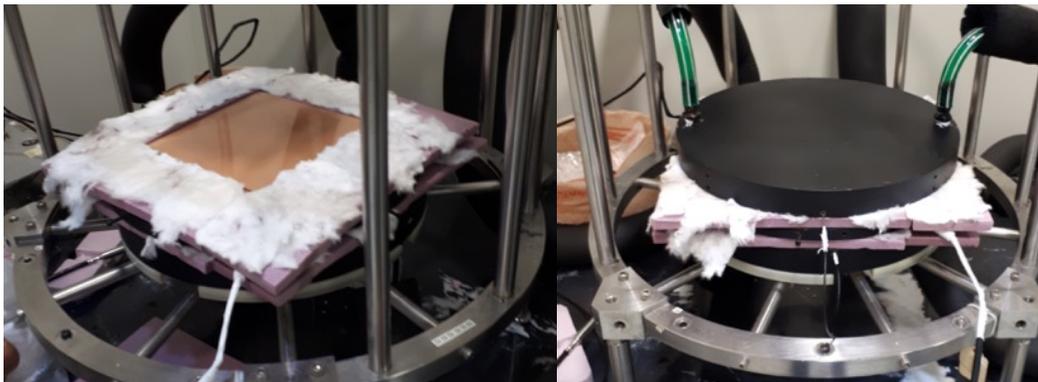


Figura 20. Colocación de muestras en conductivímetro térmico

El método primario de medición de conductividad térmica de los especímenes se midió en un aparato de placa caliente con guarda (APCG) para materiales aislantes, en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) ubicado en Querétaro, siguiendo la teoría de transferencia de calor. El principio de operación del APCG consiste de dos placas frías y una placa caliente. El equipo utilizado en la medición de conductividad térmica,  $\lambda$ , es un instrumento de placa caliente con guarda de doble lado de medición. El instrumento está compuesto por una placa caliente central y dos placas frías en los extremos. La placa caliente está formada por dos secciones concéntricas, una de medición y otra de guarda. Las placas frías están construidas con serpentines para el flujo de un líquido refrigerante. La potencia en el calefactor eléctrico en la placa caliente se suministra con una fuente de tensión (Figura 21).

Cada una de las muestras se coloca entre la placa fría y la placa caliente central, una transferencia de energía térmica (calor) se genera en la placa caliente hacia las placas frías a través de las muestras. La guarda reduce las pérdidas por

transferencia radial de calor. Las temperaturas de las placas y la guarda se miden con termopares calibrados, el área de medición y el espesor con micrómetros. La conductividad térmica se determinó a partir de la ecuación de estado estable para el instrumento de placa caliente con guarda:

$$\lambda = \frac{qL}{\Delta T 2A}$$

ec. (5)

En el cual:

$q$  es el flujo de calor a través de la muestra en  $W$ .

$\lambda$  es la conductividad térmica aparente de la muestra en  $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ .

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura aplicada a la muestra en  $^{\circ}C$  o  $K$ .

$L$  es el espesor de la muestra en  $m$ .

$A$  es el área efectiva de la sección transversal en  $m^2$ .

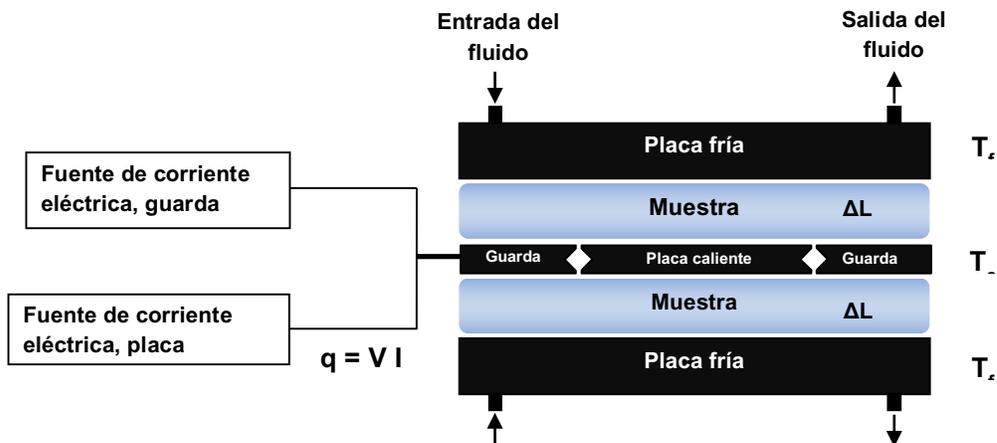


Figura 21. Esquema del aparato de placa caliente con guarda

Cuando se establece una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre la placa caliente y las frías, se genera un flujo de calor axial  $Q_e$  en la zona de medición, un flujo radial  $Q_b$  de la zona de medición a los alrededores, así como otro flujo de calor residual  $Q_{ea}$  entre la zona de medición y la guarda (Figura 22). La guarda reduce el flujo

de calor radial de la superficie de área de medición a los alrededores, es decir, se utiliza para mantener en un mínimo valor el flujo  $Q_{ea}$  (Cortés et al., 2010).

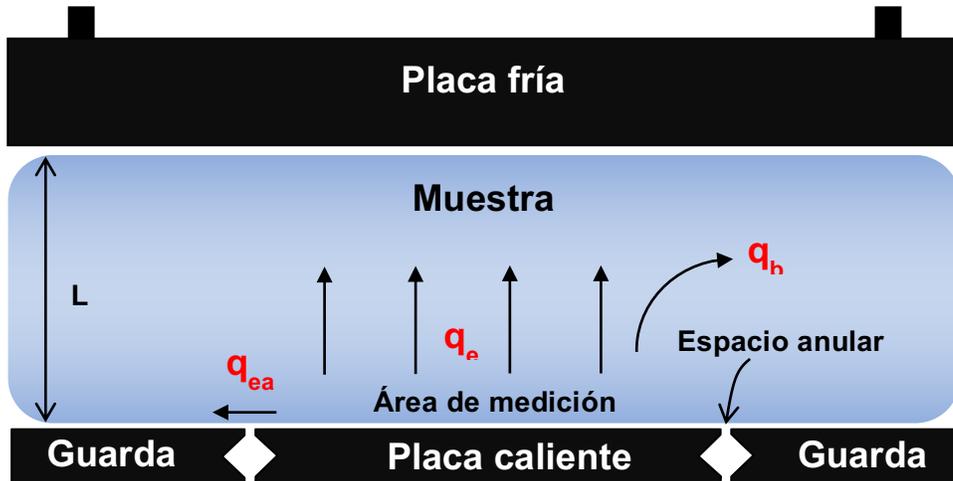


Figura 22. Mediciones del aparato de placa caliente con guarda

Las mediciones se hicieron en el laboratorio de conductividad térmica en un cuarto acondicionado con una temperatura de  $22 \pm 1$  °C y una humedad relativa de  $50 \pm 5\%$ . La toma de valores de conductividad térmica se tomó cada 30 segundos por medio del programa LabView, termopares y multímetros (Figura 23).



Figura 23. Equipo de medición de conductividad térmica

### 3.3. METODOLOGÍA DE LA FASE III

Con el material ya caracterizado, se pasó a la siguiente fase para la elaboración de tejas y comparación con otros materiales en el mercado.

#### 3.3.1. Elaboración de tejas con el material caracterizado

Las geometrías de las tejas fueron trapezoidales, debido a la facilidad de trabajo. La medida de cada teja fue de 30 x 16 x 1.3 cm (Figura 24).

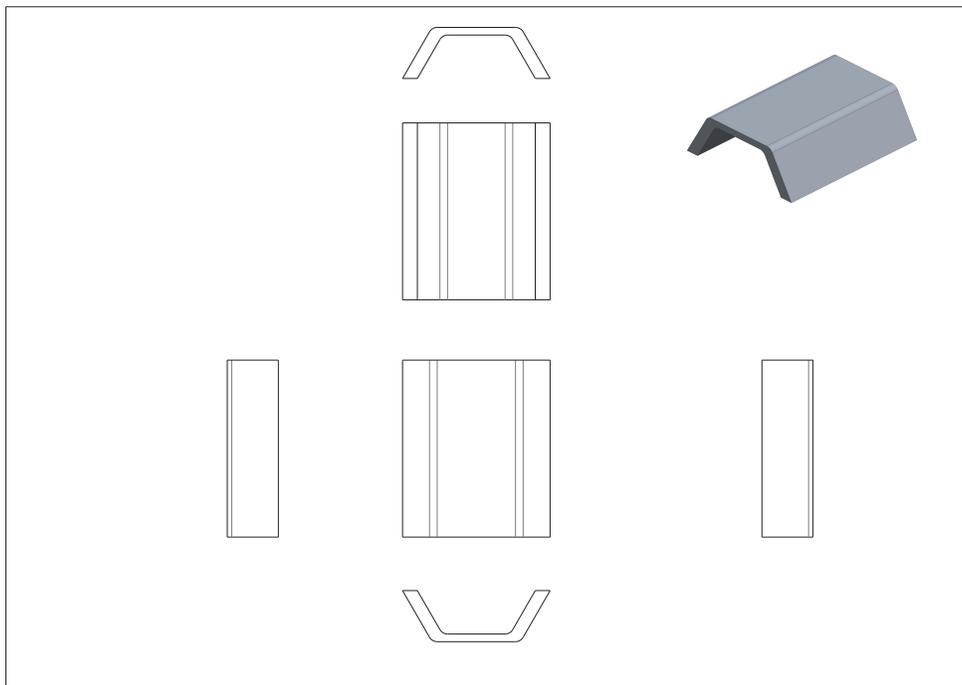


Figura 24. Vistas de las tejas

Se realizó moldes de 95 x 18 cm hechas a base de lámina galvanizada, soleras, bisagras y separadores de cuadrado para fabricar tejas (Figura 25).



Figura 25. Molde metálico de tejas

Por una parte, primero se aplicó una capa de cera desmoldante a los moldes, después se aplicó una película separadora a los moldes con cera, se dejó secar los desmoldantes y por último se atornillaron los moldes. Por otra parte, se mezcló el CPC con las fibras con el método que se utilizó para hacer los biocompuestos. Una vez lista la mezcla, se vertió en los moldes. Se penetró una varilla dentro del molde para compactar la mezcla. Lleno el molde, se dejó la mezcla para su endurecimiento. Una vez endurecida la mezcla, se desmoldó y se sumergieron las tejas durante 28 días en una solución acuosa con hidróxido de Calcio en un 3% respecto al peso del agua, para su curación.

### **3.3.2. Prueba de resistencia a la flexión**

Las tejas se introdujeron en un horno a 100 °C durante 24 horas para tener un peso constante de las tejas. Después de las 24 horas, se sacaron las tejas del horno y se tomaron las dimensiones y el peso (Figura 26 y 27). Se lijaron las tejas para tener una mejor planicidad.



Figura 26. Lectura de dimensiones



Figura 27. Lectura de peso

Para realizar la prueba de resistencia a la flexión se adaptó la prensa de anillos utilizada en la resistencia a la compresión con soportes metálicos. Se probaron las tejas en un modo de flexión de 3 puntos en un plano horizontal, la superficie inferior de la teja apoyada con dos metales de soporte inferiores y la superficie superior con la carga aplicada a la mitad de la teja, mediante un tercer metal en movimiento en una dirección perpendicular al plano de la teja (Figura 28). La separación de los soportes inferiores fue de 20 cm (2/3 partes de la teja) como lo establece la norma.



Figura 28. Resistencia a la flexión de 3 puntos

Para determinar la resistencia a la flexión se utilizó la siguiente ecuación:

---

$$R = \frac{3FL}{2wh^2}$$

ec. (6)

Donde:

R= Resistencia a la flexión o módulo de ruptura, MPa o psi,

F= Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N o lbf,

L= Longitud de la separación de apoyos, mm o in,

w= Ancho promedio del espécimen, mm o in

h= Espesor promedio del espécimen, mm o in.

### 3.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Diseño del experimento

Se desarrolló el siguiente diseño experimental (Tabla 8) para evaluar el efecto de las fibras en la matriz en las propiedades mecánicas.

**Tabla 8. Diseño experimental**

<b>Longitud de fibras (mm)</b>	<b>Tamaño de tepexil (mm)</b>	<b>Relación a/c 0.4:1</b>
		<b>Proporciones CPX: TX: FBA</b>
6	1.18	1:1:0
		1:0:1
		1:0:2

Se hicieron 3 repeticiones por edad para la prueba de resistencia a la compresión. En la Tabla 9, se muestran los códigos de cubos que se utilizaron para su identificación en el día de la prueba.

Tabla 9. Códigos de cubos

Proporciones	Código del cubo		
CPC: TX: FBA			
1:1:0	C01	C02	C03
	C04	C05	C06
	C07	C08	C09
1:0:1	C51	C52	C53
	C54	C55	C56
	C57	C58	C59
1:0:2	C61	C62	C63
	C64	C65	C66
	C67	C68	C69

---

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### 4.1. Resultados de la fase I

Se logró, por medio de las dos moliendas, acondicionar las fibras del bagazo de agave con tamaños de  $6 \pm 2$  mm. (Figura 29), tamaños establecidos para realizar los materiales biocompuestos.



Figura 29. Fibras de tamaños de 6 mm.

La lignina es un polímero natural complejo compuesto por unidades de propilbenceno sustituidas, principalmente, con grupos funcionales metoxílicos ( $\text{OCH}_3$ ) e hidroxílicos ( $\text{OH}$ ), y en menor proporción por grupos carboxílicos ( $\text{COOH}$  y  $\text{CO}$ ) (Figura 30) (Pettersen, 1984; Campbell & Sederoff, 1996).

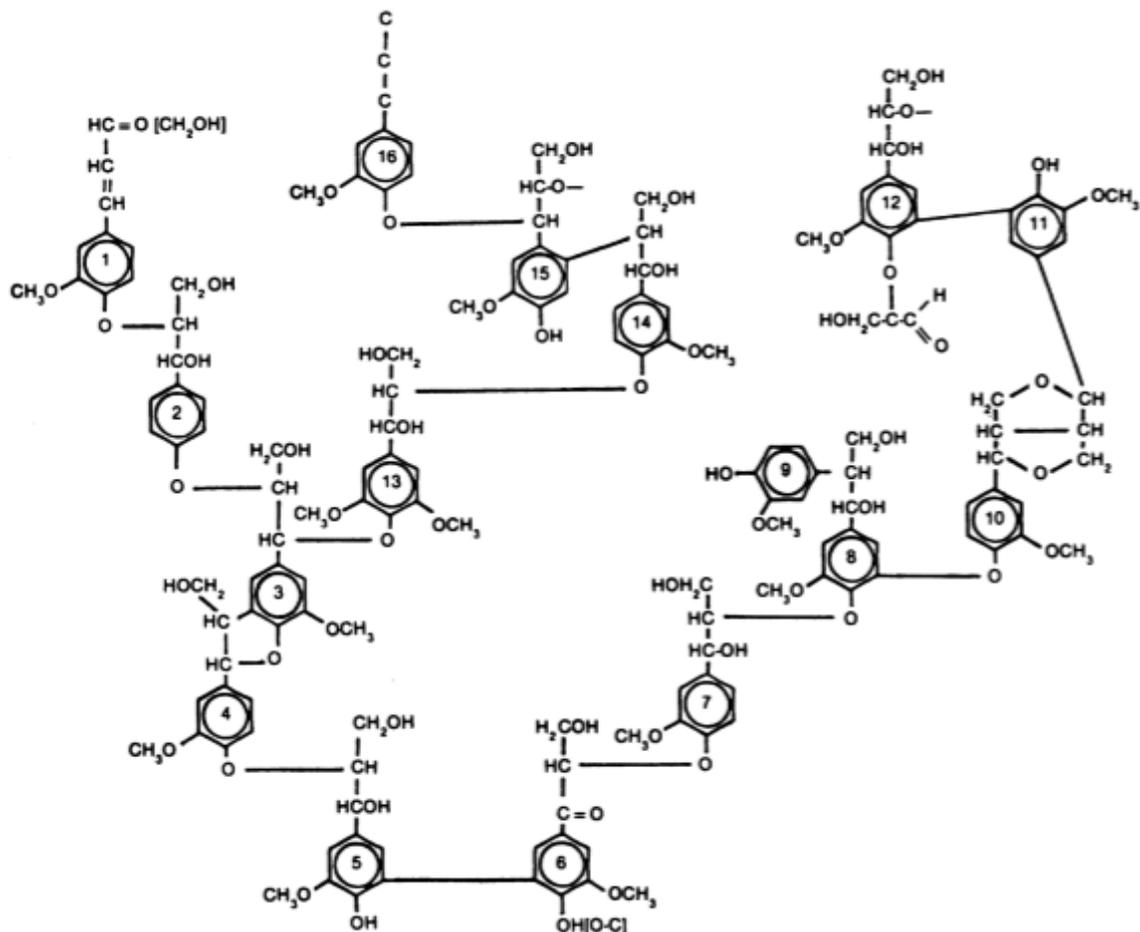


Figura 30. Estructura química parcial de la lignina

En el espectro FST (Figura 31), se encuentra una banda de absorción a  $1732\text{ cm}^{-1}$ , que se puede atribuir a las vibraciones de grupos carbonilo no conjugados ( $\text{C}=\text{O}$ ), y otra a  $1234\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente a los enlaces  $\text{C}-\text{O}$  de los anillos siringilos, ambos tipos de grupos funcionales están presentes en la lignina (Saliba et al, 2001). En el espectro FT no se observa ningún pico alrededor de  $1730$  y  $1230\text{ cm}^{-1}$ , lo que comprueba que la lignina fue eliminada de las fibras después del tratamiento con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Figura 32).

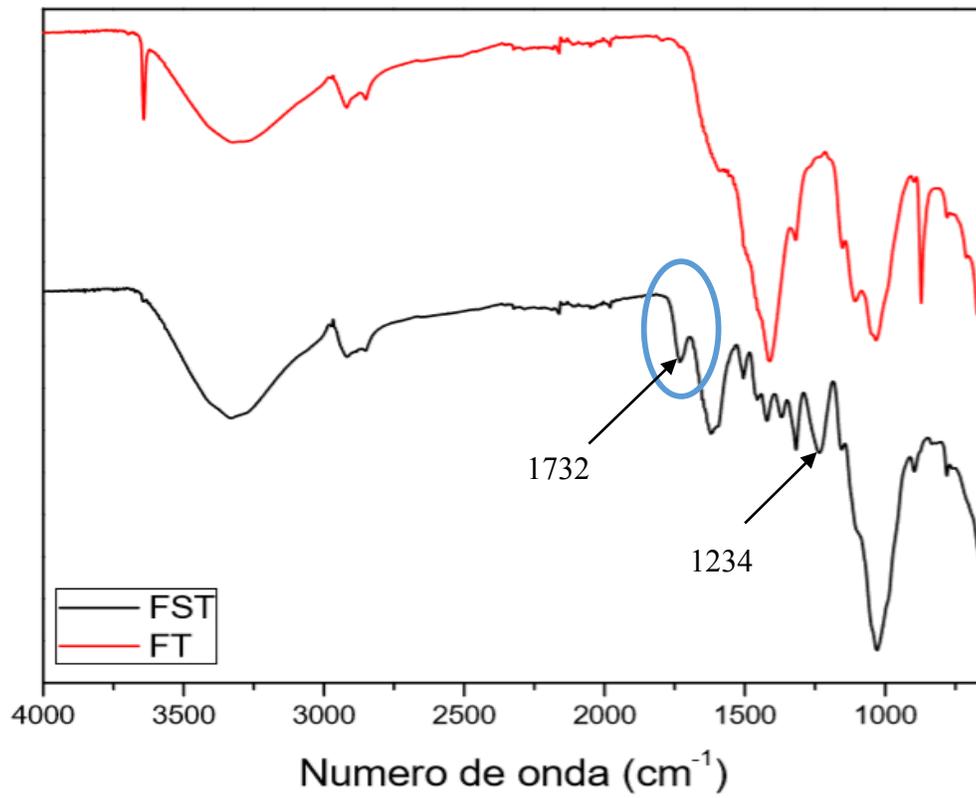


Figura 31. Espectro FTIR de las fibras sin tratamiento (línea negra) y fibras tratadas con Ca(OH)<sub>2</sub> (línea roja).

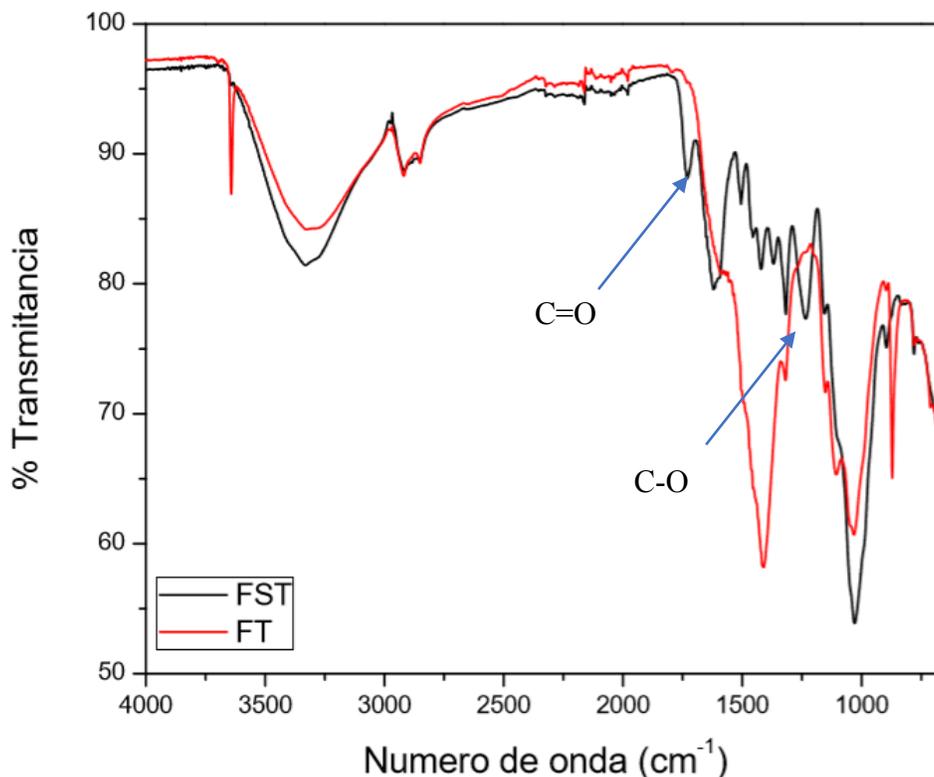


Figura 32. Comparación de espectros FTIR de las fibras sin tratamiento (línea negra) y fibras tratadas con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (línea roja).

## 4.2. Resultados de la fase II

### 4.2.1. Efecto de la proporción de fibras y la resistencia a la compresión

A continuación, se presentan en las Gráficas 1 y 2 los resultados obtenidos de densidad y resistencia a la compresión respectivamente a las edades de 7, 14 y 28 días. Se observa que la resistencia a la compresión incrementa con respecto a la edad, tal como se reporta en las literaturas (Neville, 1995; Metha & Monteiro, 1998; Kosmatka et al 2004). En la Tabla 10, se observa que el aumento de proporción de fibras reduce la resistencia a la compresión.

A la edad de 7 días, la proporción 1:0:1 presentó una disminución de resistencia a la compresión con respecto al control de 54.09%. Se observa que la resistencia a la compresión a los 7 días de las proporciones 1:1:0 y 1:0:1 superan a los

morteros tipo O requerido en la norma ASTM C 270 – 07, que es de 2.4 MPa.

A 14 días de edad, la proporción 1:0:1 presentó una disminución de resistencia a la compresión con respecto al control de 48.18%. La misma proporción tuvo un aumento en la resistencia a la compresión con respecto a la edad de 7 días de 23.60%. El espécimen control tuvo una desviación estándar elevada debido a las lecturas de la prensa manual, esa es la razón por la cual disminuyó la resistencia a la compresión un 0.46%.

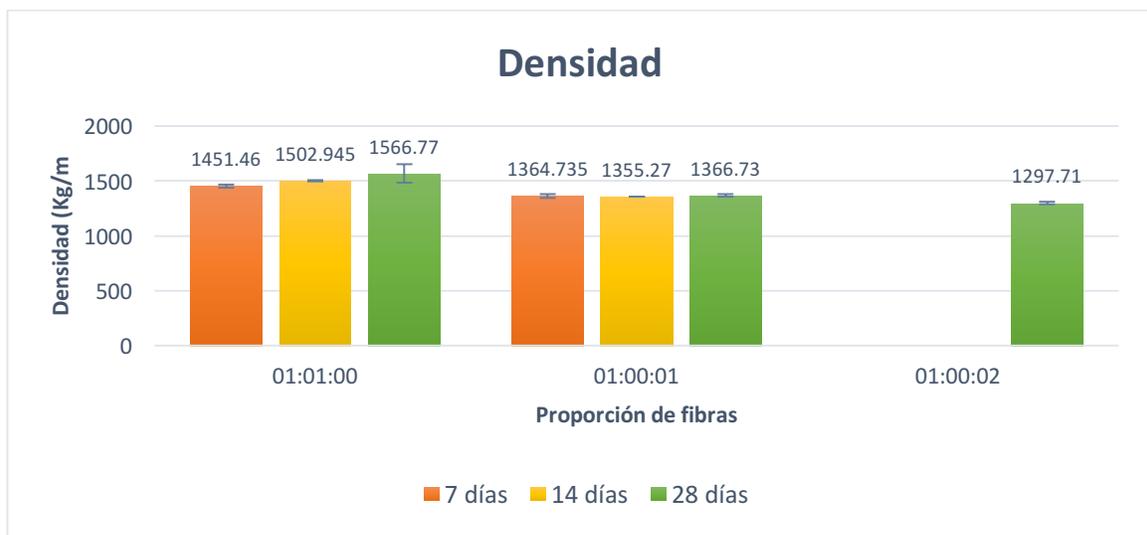
A la edad de 28 días, las mezclas que contienen fibras presentaron disminuciones de resistencia a la compresión respecto al control mayores al 50%. A la misma edad, se observa un aumento en la resistencia a la compresión de la mezcla control del 15.78% con respecto a la edad de 14 días. La mezcla 1:0:1 presentó una disminución en la resistencia a la compresión de 50.08% respecto al control a la edad de 28 días. La mezcla 1:0:2 presentó una reducción en la resistencia a la compresión de 81.13% respecto al control y 62.20% respecto a la mezcla 1:0:1 a la edad de 28 días. La mezcla 1:0:2 no supera lo requerido por la norma ASTM C 270 – 07. Se observa que la ausencia de tepexil afecta disminuyendo la resistencia a la compresión.

Por otra parte, se observa que el aumento en la proporción de fibras produce una densidad baja de las muestras. Esto se debe al hecho del empaquetamiento de las fibras, que se hacen difíciles al alto contenido de fibras y se introducen huecos en el compuesto. A causa de la baja densidad, la resistencia a la compresión disminuye cuando la proporción de fibras aumenta (Khedari et al., 2001; Paramasivam, Nathant & Gupta, 1984).

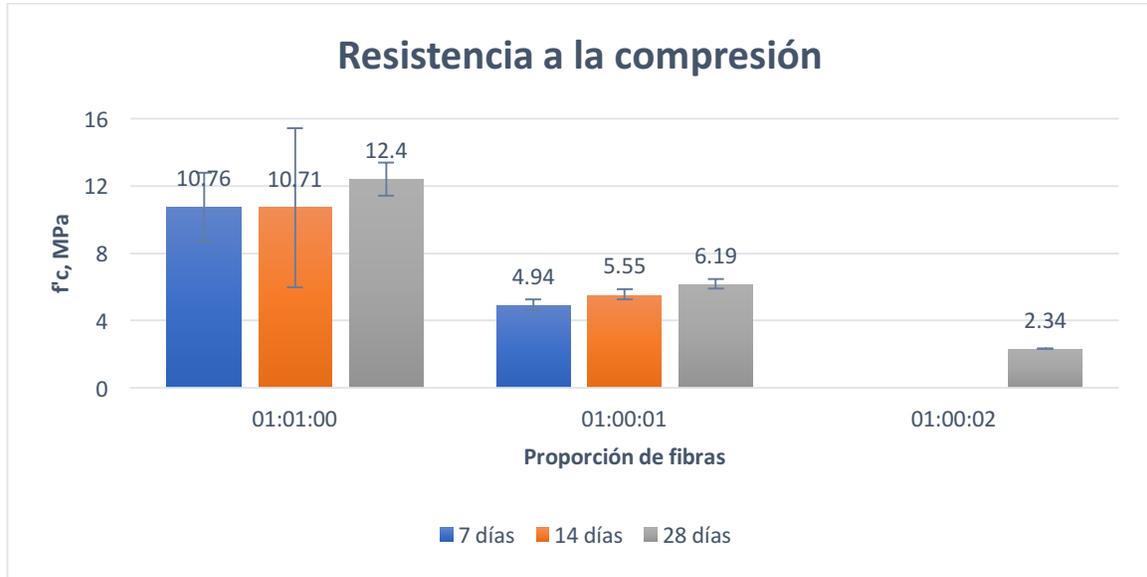
Una de las ventajas de las fibras lignocelulósicas es su baja densidad, lo cual se traduce en materiales más ligeros. En la proporción de 1:0:1 (CPC: TX: FBA) se tiene una resistencia a la compresión superior a 5.2 MPa a los 14 días, mientras la proporción 1:0:2 está por debajo de lo requerido por la norma ASTM C 270 – 07 con un valor de 2.34 MPa a los 28 días.

Tabla 10. Resistencia a la compresión

Proporción de fibras CPC: TX: FBA	7 días		14 días		28 días	
	f'c (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1:1:0	10.76 ± 2.03	1451.46 ±13.57	10.71 ±4.73	1502.95 ±5.83	12.4 ±0.99	1566.77 ±85.43
1:0:1	4.94 ±0.31	1364.73 ±17.55	5.55 ±0.30	1355.27 ±1.37	6.19 ±0.30	1366.73 ±12.67
1:0:2	-	-	-	-	2.34 ±0.02	1297.71 ±10.21



Gráfica 1. Comparación gráfica de densidades obtenidas



Gráfica 2. Comparación gráfica de resistencias a la compresión obtenidas

#### 4.2.2. Efecto de la proporción de fibras y la conductividad térmica

Se realizaron mediciones de conductividad térmica a las muestras de proporciones 1:1:0, 1:0:1, 1:0:2 (CPC: TX: FBA), y una muestra de arcilla cerámica, la cual están hechas las tejas mayoritariamente.

Las muestras se colocaron en el APCG y se estableció una diferencia de temperatura de 17 °C. Se estableció las temperaturas de las placas frías que estuvieran en promedio de 20.37 °C y para la placa caliente manejar una diferencia de 17 °C. En promedio la temperatura de la placa caliente estuvo en 37.305 °C. Cuando se alcanzó el estado estable en la placa caliente se inició con la adquisición de datos.

Se mantuvo un control de la humedad relativa de  $50 \pm 5\%$  y una temperatura ambiental de  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ .

A continuación, en las Tablas 11, 12, 13 y 14, se muestran los resultados de conductividades térmicas de las mezclas.

Tabla 11. Resultados del material de arcilla cerámica

<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Característica:</b> Material de Arcilla cerámica	
<b>Identificación:</b> 1-C y 2-C	
<b>Dimensiones:</b> Placas de 16 cm x 16 cm x 1.203 cm	
	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de placa caliente con guarda	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con aparato de placa caliente con guarda	
<b>Valores experimentales</b>	
Nombre de la variable	Valor
Temp. en placa caliente / °C	37.41
Temp. en placa fría / °C	20.38
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	17.03
Temp. media o de la prueba / °C	28.9
Temp. ambiente / °C	22.4
Humedad relativa / %HR	52
Espesor promedio de las muestras / m	0.01203
Área de medición / m <sup>2</sup>	0.0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	<b>0.250</b>
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	<b>2.5</b>

Tabla 12. Resultados del material 1:1:0 (CPC:TX:FBA)

<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Característica:</b> Material mortero con arcilla	
<b>Identificación:</b> 1-T-B y 1-T-C	
<b>Dimensiones:</b> Placas de 16 cm x 16 cm x 1.274 cm	
	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de placa caliente con guarda	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con aparato de placa caliente con guarda	
<b>Valores experimentales</b>	
Nombre de la variable	Valor
Temp. en placa caliente / °C	37.23
Temp. en placa fría / °C	20.39
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	16.84
Temp. media o de la prueba / °C	28.8
Temp. ambiente / °C	22.4
Humedad relativa / %HR	52
Espesor promedio de las muestras / m	0.01274
Área de medición / m <sup>2</sup>	0.0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	<b>0.197</b>
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	<b>6</b>

Tabla 13. Resultados del material 1:0:1 (CPC:TX:FBA)

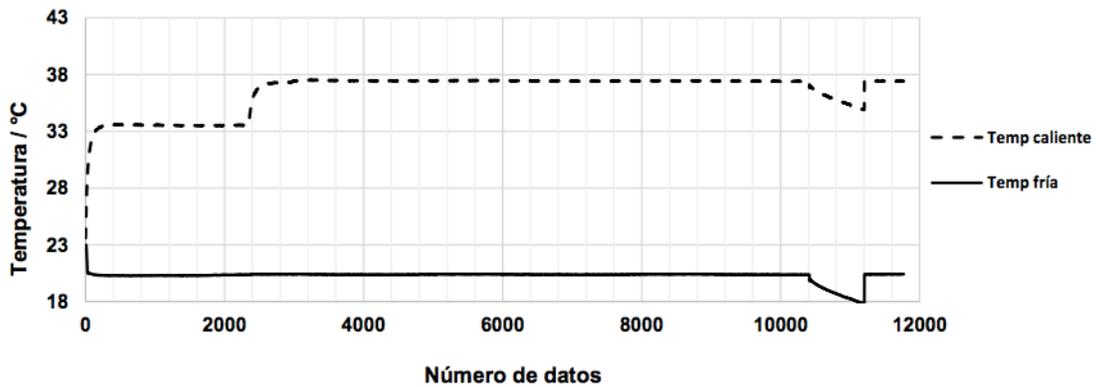
<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Característica:</b> Material de mortero con fibras, 1:1.	
<b>Identificación:</b> 1-1-A y 1-1-B	
<b>Dimensiones:</b> Placas de 16 cm x 16 cm x 1.121 cm	
	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de placa caliente con guarda	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con aparato de placa caliente con guarda	
<b>Valores experimentales</b>	
Nombre de la variable	Valor
Temp. en placa caliente / °C	37.34
Temp. en placa fría / °C	20.35
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	16.99
Temp. media o de la prueba / °C	28.9
Temp. ambiente / °C	22.2
Humedad relativa / %HR	52
Espesor promedio de las muestras / m	0.01121
Área de medición / m <sup>2</sup>	0.0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	<b>0.166</b>
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	<b>4</b>

Tabla 14. Resultados del material 1:0:2 (CPC:TX:FBA)

<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Característica:</b> Material de mortero con fibras, 1:2.	
<b>Identificación:</b> 1-2-A y 1-2-C	
<b>Dimensiones:</b> Placas de 16 cm x 16 cm x 1.117 cm	
	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de placa caliente con guarda	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con aparato de placa caliente con guarda	
<b>Valores experimentales</b>	
Nombre de la variable	Valor
Temp. en placa caliente / °C	37.24
Temp. en placa fría / °C	20.36
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	16.88
Temp. media o de la prueba / °C	28.8
Temp. ambiente / °C	22.3
Humedad relativa / %HR	51
Espesor promedio de las muestras / m	0.01117
Área de medición / m <sup>2</sup>	0.0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	<b>0.115</b>
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	<b>5</b>

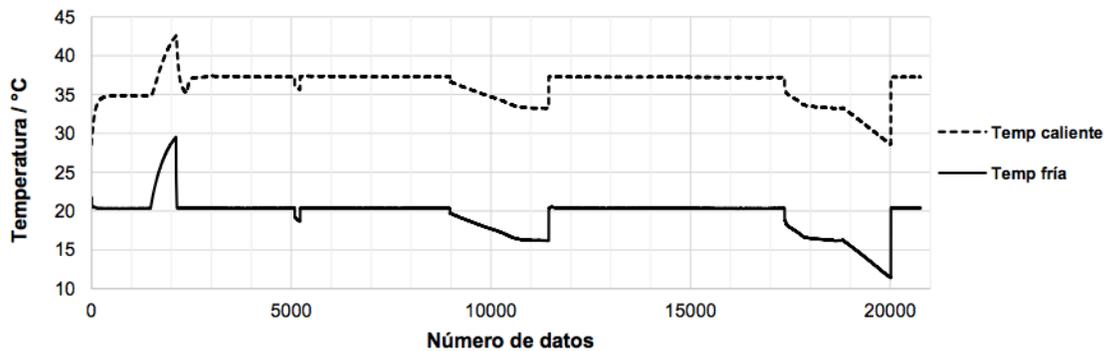
Las mediciones se realizaron durante 8 días por muestra teniendo un comportamiento de temperaturas de placas fría y caliente como se observan en las gráficas 3, 4, 5 y 6.

En la gráfica 3, se observa que se obtuvo una temperatura estable del dato de 3200 de la placa caliente.



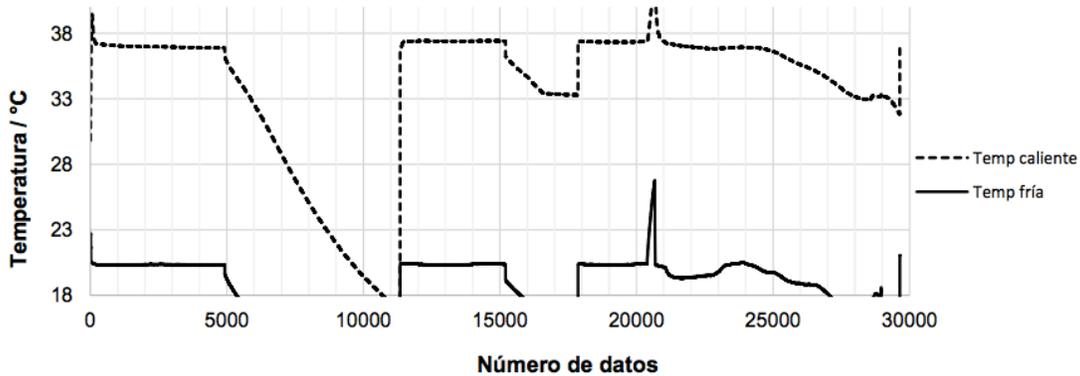
Gráfica 3. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra de arcilla cerámica

En la gráfica 4, se observa las temperaturas estables entre los datos del 2500 al 9000 y del 11500 al 17200.



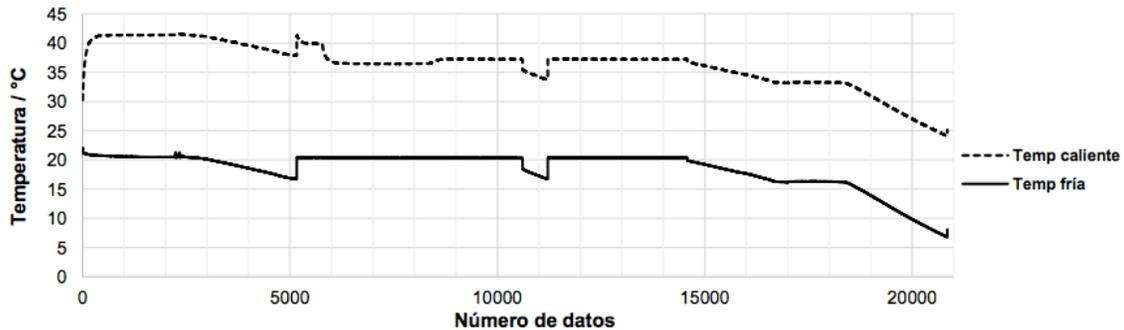
Gráfica 4. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra 1:1:0 (CPC: TX: FBA)

En la gráfica 5, se observa diferentes cambios en las temperaturas de las placas fría y caliente, debido al mantenimiento de electricidad que hubo en las instalaciones. Se notó la temperatura estable entre los datos del 100 al 5000, 11100 al 15000 y del 18000 al 20500.



Gráfica 5. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra 1:0:1 (CPC: TX: FBA)

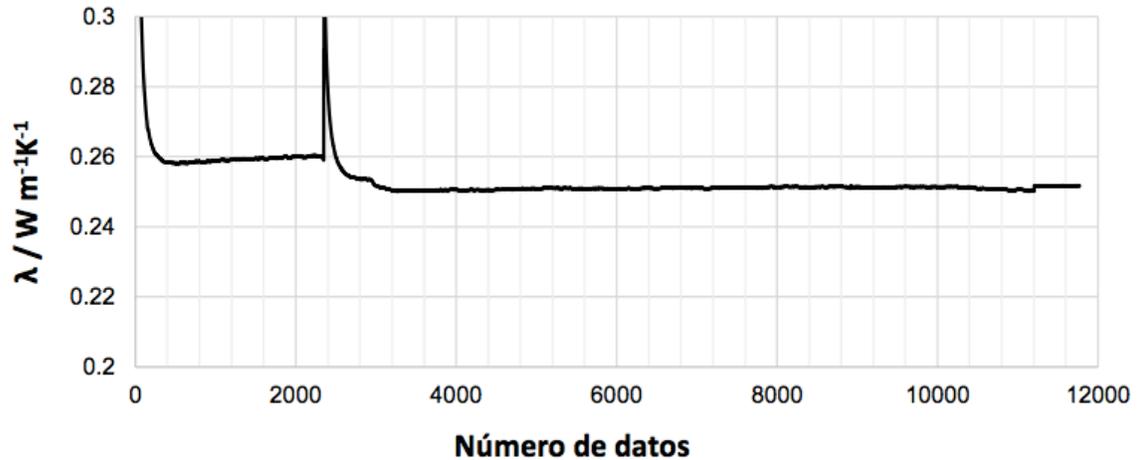
En la gráfica 6, se notó la temperatura estable entre los datos del 6000 al 14500.



Gráfica 6. Comportamiento de temperatura fría y caliente de la muestra 1:0:2 (CPC: TX: FBA)

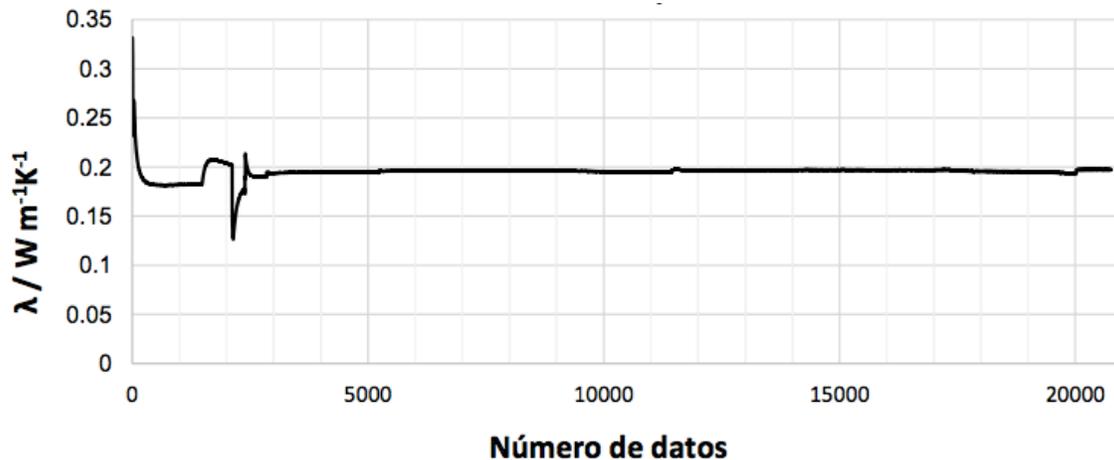
También se observó el comportamiento de la conductividad térmica durante 8 días, como se muestran en las gráficas 7, 8, 9 y 10.

En la Gráfica 7, se estabilizó el valor de conductividad térmica a partir de los datos del 3200 en adelante.



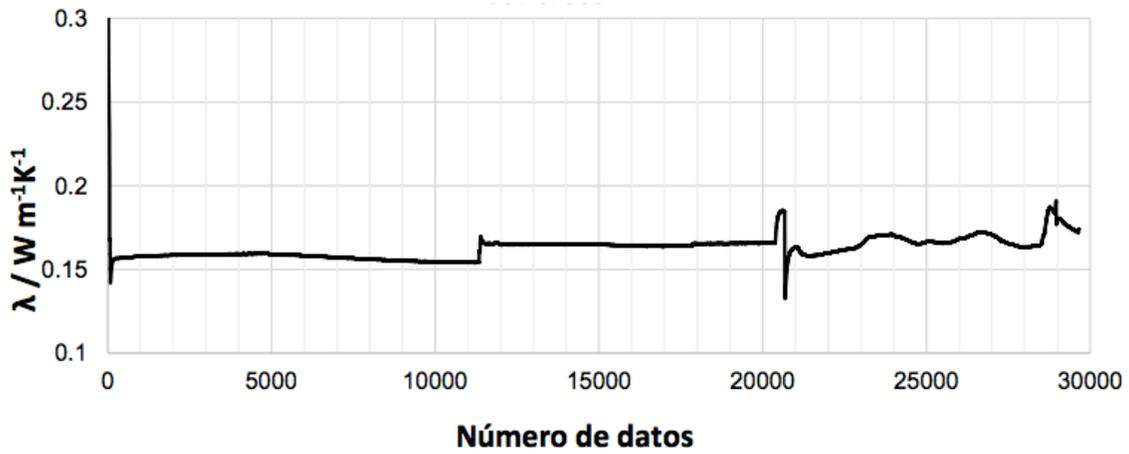
Gráfica 7. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra de arcilla cerámica

En la gráfica 8, se estabilizó la conductividad térmica a partir del dato 3000 en adelante.



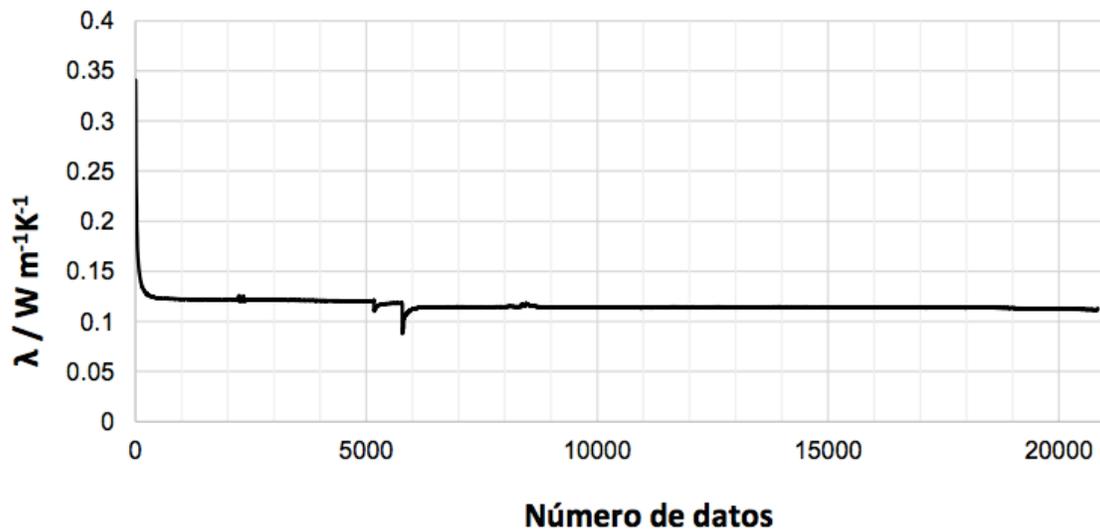
Gráfica 8. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra 1:1:0 (CPC: TX: FBA)

En la Gráfica 9, se nota que se estabilizó la conductividad térmica entre los datos del 11300 al 20300.



Gráfica 9. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra 1:0:1 (CPC: TX: FBA)

En la Gráfica 10, la conductividad térmica se estabiliza en el dato del 6000 en adelante.



Gráfica 10. Comportamiento de conductividad térmica de la muestra 1:0:2 (CPC: TX: FBA)

En resumen, como se muestra en la Tabla 15, se observa que disminuye la conductividad térmica cuando hay mayor concentración de FBA (Khedari et al., 2001; Khedari, Watsanasathaporn & Hirunlabh, 2005). Si se compara la muestra de Arcilla con las demás mezclas, se consiguió disminuir la conductividad térmica. También se observa que el peso y la densidad de los materiales disminuye al aumento de las FBA.

Tabla 15. Resumen de conductividades térmicas

Muestra (CPC:TX:FBA)	Espesor m	Conductividad térmica aparente $W m^{-1} K^{-1}$	Densidad $Kg/m^3$
Arcilla cerámica	0.01210	$0.250 \pm 0.003125$	1879.42
1:1:0	0.01274	$0.197 \pm 0.00591$	1573.25
1:0:1	0.01197	$0.166 \pm 0.00332$	1355.70
1:0:2	0.01117	$0.115 \pm 0.002875$	1290.46

Con la mezcla 1:1:0 (Control) se logró reducir la conductividad térmica a  $0.197 W m^{-1} K^{-1}$  con respecto de un mortero ordinario con valor de  $1.6452 W m^{-1} K^{-1}$  (Khedari et al., 2001) y la muestra de Arcilla cerámica con valor de  $0.250 W m^{-1} K^{-1}$ , debido por el tipo y tamaño de agregado fino.

Con las mezclas de 1:0:1 y 1:0:2 se alcanzaron reducir las conductividades térmicas con respecto al control, es decir, las mezclas con fibras logran ser más aislantes térmicos que con tepexil. Con las mismas mezclas, se observan las influencias de las fibras en la conductividad térmica de  $0.166$  a  $0.115 W m^{-1} K^{-1}$  respectivamente. La ventaja de

La mezcla 1:0:2 tiene la menor conductividad de todas las muestras, debido a que es el espécimen de menor densidad, por lo tanto, la conductividad térmica es

inversamente proporcional a la densidad (Onésippe et al., 2010; Khedari et al., 2001; Asasutjarit et al., 2007).

En el CENAM, se consideran materiales aislantes a todo material con conductividad térmica de  $0.03$  a  $0.17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Si se comparan las muestras 1:0:1 y 1:0:2 (CPC: TX: FBA) con los valores de materiales aislantes que establece el CENAM, se observa que son materiales aislantes con conductividades térmicas de  $0.166$  y  $0.115 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y superan a las muestras control (arcilla cerámica y cemento-tepexil).

### 4.3. Resultados de la fase III

#### 4.3.1. Elaboración de tejas

Se realizaron las mezclas y se agregaron en el molde metálico para adquirir la forma de la teja. Cuando las mezclas de las tejas endurecieron, la proporción 1:0:2 (CPC: TX: FBA) fue la que tuvo mayor dificultad para desmoldar por la fragilidad del material biocompuesto, debido a la cantidad de fibras que contiene.

Se realizaron 3 tejas por cada proporción caracterizada y se agregaron 3 tejas más de arcilla cerámica (Figura 33).

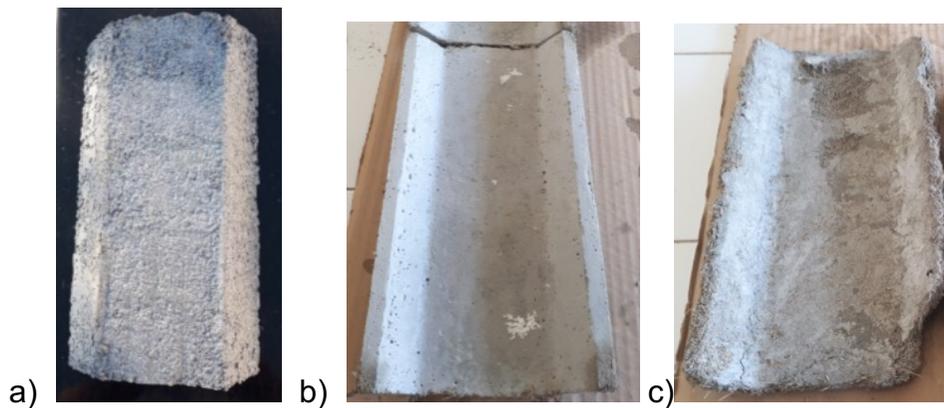




Figura 33. Tejas; a) 1:1:0 b) 1:0:1 c) 1:0:2 d) Arcilla cerámica

### 5.3.1. Efecto de la proporción de fibras y la resistencia a la flexión

En la Tabla 16, se muestran las resistencias a la flexión de las tejas con proporciones 1:1:0, 1:0:1 y 1:0:2 (CPC,TX,FBA) y de las tejas de arcilla cerámica.

Tabla 16. Resistencia a la flexión

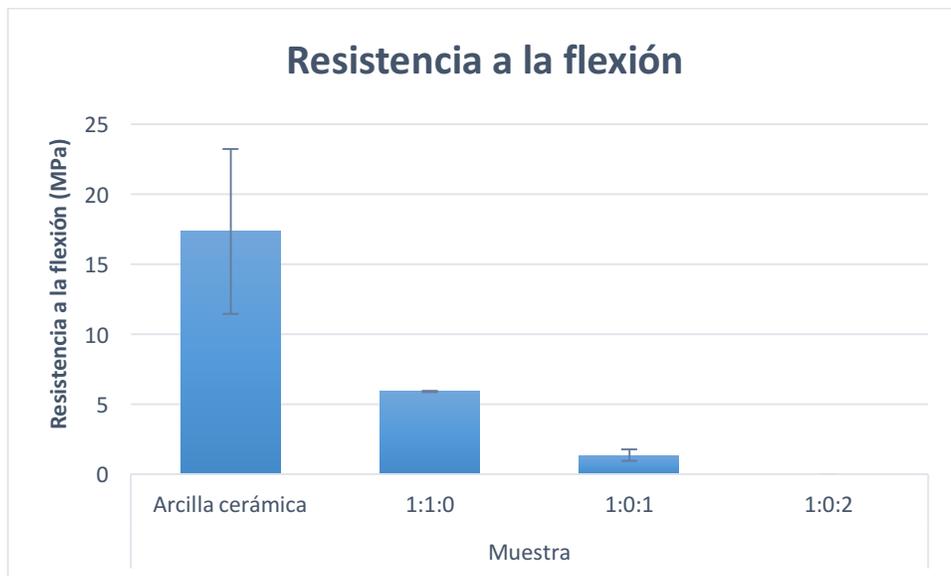
Muestra (CPC:TX:FBA)	Carga máxima (N)	MOR (MPa)
Arcilla cerámica	1204.4 ± 369.6	17.355 ± 5.885
1:1:0	491.65 ± 26.45	5.93 ± 0.05
1:0:1	112.3 ± 13.7	1.375 ± 0.395
1:0:2	0	0

La presencia de fibras reduce la resistencia a la flexión y la carga máxima de las tejas como se observan en las gráficas 11 y 12. Las tejas de 1:0:1 (CPC:TX:FBA) no superaron la carga máxima y la resistencia a la flexión de las tejas cerámicas. Las tejas 1:1:0 y 1:0:1 no superan lo requerido de carga máxima por la norma ASTM C 1492 – 03 que es de 1001 N. Las tejas 1:0:2 no se pudieron ensayar debido a la fragilidad del material biocompuesto por el contenido de fibras (Figura 34). Las tejas se desintegraban al momento de transportarlo a la prensa de anillos.

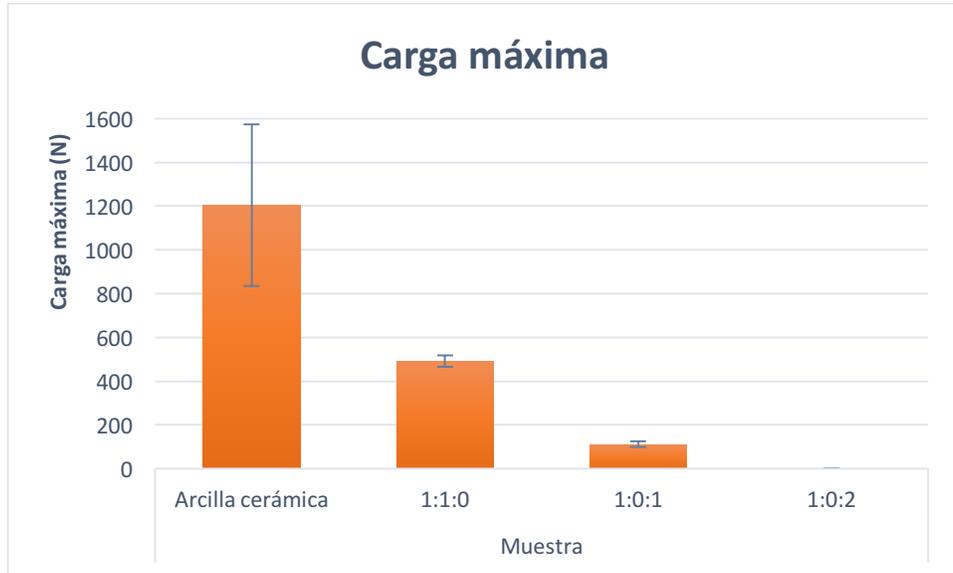


Figura 34. Teja 1:0:2 (CPC:TX:FBA).

Las tejas 1:1:0 (control) y 1:0:1 tuvieron reducciones de 47.8% y 22.2% respectivamente comparado con sus resistencias a la flexión.



Gráfica 11. Comparación gráfica de las resistencias a la flexión obtenidas



Gráfica 12. Comparación gráfica de las cargas máximas obtenidas

En la prueba de resistencia a la flexión se observó que las tejas de arcilla cerámica y 1:1:0 tuvieron una fractura frágil sin apreciar una deformación plástica, esto se debe a la ausencia de un material de refuerzo como las fibras (Figura 35). Con las tejas 1:0:1 las fracturas de las tejas fueron lentas, debido a que la matriz transmite la mayor fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada (Figura 36).



Figura 35. Teja sin refuerzo



Figura 36. Teja con refuerzo

## DISCUSIÓN

En la Tabla 17, se muestran las densidades, resistencia a la compresión y su conductividad térmica de diversos materiales.

Tabla 17. Propiedades de materiales

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	F'c (MPa)	$\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Referencia
Mortero ordinario	2000	22.0 <sup>a</sup>	1.6452	Khedari et al., 2001
Cemento con fibras de Coco	959	2.46 <sup>a</sup>	0.2543	Khedari et al., 2001
Cemento con fibras de Durian	1456	3.29 <sup>b</sup>	0.3506	Khedari et al., 2001
Tablero de cemento con fibras de coco <sup>c</sup>	700	-	0.1094	Asasutjarit et al., 2007
Tablero de celulosa comercial	1560	-	0.68	Asasutjarit et al., 2007
Block de suelo- cemento con fibras de coco <sup>d</sup>	1586.77	3.88	0.6510	Khedari, Watsanasathaporn & Hirunlabh, 2005
Arcilla	2100	-	0.93	NBE-CT-79
Hormigón celular sin áridos	305	-	0.09	NBE-CT-79
Concreto armado	2300	-	1.740	NOM-020-ENER-2011
Simple al exterior	2200	-	1.650	NOM-020-ENER-2011
Ligero al exterior	1250	-	0.698	NOM-020-ENER-2011
<b>Arcilla cerámica</b>	<b>1879.42</b>	<b>-</b>	<b>0.250</b>	<b>El presente estudio</b>
<b>1:1:0<sup>e</sup></b>	<b>1573.25</b>	<b>12.4</b>	<b>0.197</b>	<b>El presente estudio</b>
<b>1:0:1<sup>e</sup></b>	<b>1355.70</b>	<b>6.19</b>	<b>0.166</b>	<b>El presente estudio</b>
<b>1:0:2<sup>e</sup></b>	<b>1290.46</b>	<b>2.34</b>	<b>0.115</b>	<b>El presente estudio</b>

<sup>a</sup> 10 días de curado.

<sup>b</sup> 10 días de curado y después 13 días en el aire.

<sup>c</sup> Cemento:fibras de coco:agua 2:1:2.

<sup>d</sup> Tierra:cemento:arena 5.75:1.25:2 y 0.8 kg de fibras de coco.

<sup>e</sup> CPC: TX: FBA y a los 28 días de curado.

La mezcla 1:0:1 (CPC:TX:FBA) tiene una resistencia a la compresión aceptable a la norma ASTM C 270 – 07 y una conductividad térmica menor a lo requerido de materiales aislantes por los criterios del CENAM. La influencia de las fibras favorece en la conductividad térmica por su porosidad, obteniendo valores más bajos con respecto al mortero ordinario y arcilla.

Como se observa en la Tabla 18, la mezcla 1:0:2 (CPC:TX:FBA), aunque presentó la menor resistencia a la compresión, tuvo una conductividad térmica menor a lo solicitado de materiales aislantes por los criterios del CENAM. El hormigón celular y el material compuesto de 2:1:2 (Cemento:fibras de coco:agua) tienen conductividades térmicas menores a la mezcla 1:0:2, debido a las densidades de los materiales que son menores.

Tabla 18. Comparación de resistencia a la flexión

Tejas	Carga máxima (N)	MOR (MPa)	Referencia
Arcilla cerámica	1204.4 ± 369.6	11.67 ± 4.02	El presente estudio
1:1:0	491.65 ± 26.45	4.02 ± 0.1	El presente estudio
1:0:1	112.3 ± 13.7	0.73 ± 0.05	El presente estudio
1:0:2	0	0	El presente estudio
Cemento con fibras de sisal	1111	-	Roma, Martello & Savastano, 2008
Arcilla cerámica	1000	-	UNE EN 538
Cemento y fibras de coco	588.4	-	Darsanna et al., 2016
Arcilla roja	-	9.3	Amado, Villafrades & Tuta, 2011
Cerámicas	1100	18	ISO 10545-4

Las tejas de las muestras 1:1:0, 1:0:1 y 1:0:2 no superan la carga máxima ni la resistencia a la flexión de los otros materiales de la Tabla 18. La ausencia de agregado fino en las mezclas del presente estudio tuvo desventajas disminuyen las resistencias a la compresión y flexión.

La ventaja de las fibras en el presente estudio es que la matriz transmite el esfuerzo a las fibras, aumentando la protección del material por más tiempo. Además, disminuyó considerablemente el peso de las tejas logrando hacer un material ligero. Asimismo, redujo la densidad y conductividad térmica del material, creando un material con aislamiento térmico.

## CONCLUSIONES

- Fase I. Se logró acondicionar las fibras de bagazo de agave eliminando la lignina con el tratamiento de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en solución acuosa de al 10%.
- Fase II. La proporción óptima de CPC:TX:FBA fue 1:0:1, con resistencia a la compresión de 6.19 MPa, densidad de  $1366.73 \text{ kg/m}^3$  y conductividad térmica de  $0.166 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . La presencia de fibras de bagazo de agave en el CPC reduce la resistencia a la compresión, la densidad y la conductividad térmica del material biocompuesto. Se consiguió un material biocompuesto ligero y aislante.
- Fase III. La adición de fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw disminuyó la carga máxima y la resistencia a la flexión de las tejas.

## REFERENCIA

Abdullah, A., Jamaludin, S. B., Anwar, M. I., Noor, M. M., & Hussin, K. (2011). Assessment of physical and mechanical properties of cement panel influenced by treated and untreated coconut fiber addition. *Physics Procedia*, 22, 263-269.

Aguilar, P. A., Quesada-Solís, K., Sibaja-Ballesteros, R., & Vega-Baudrit, J. R. (2005). Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 6(2), 4.

Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and environment*, 40(3), 353-366.

AMADO, J. D. S., VILLAFRADES, P. Y. M., & TUTA, E. M. C. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167), 50-58.

de Andrade Silva, F., Toledo Filho, R. D., de Almeida Melo Filho, J., & Fairbairn, E. D. M. R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777-785.

Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmati, B., & Shin, U. C. (2007). Development of coconut coir-based lightweight cement board. *Construction and Building Materials*, 21(2), 277-288.

Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). International Thomson Editores.

Beer, F. P., Johnston E. R. Jr., & Dewolf J. T. (2004). *Mecánica de materiales*, 3ra. Edición, Editorial McGraw-Hill.

Bentur, A., & Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press.

Brigante, D. (2014). *New composite materials*. Springer International Publishing.

Callister, W. D. (2002). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* (Vol. 1). Reverté.

Campbell, M. M., & Sederoff, R. R. (1996). Variation in Lignin Content and Composition (Mechanisms of Control and Implications for the Genetic Improvement of Plants). *Plant physiology*, 110(1), 3.

Castañeda-Nolasco, G., & Vecchia, F. (2007). Sistema de techo alternativo para vivienda progresiva en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Ingeniería*, 11(2), 21-30.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México, Servicio Meteorológico Nacional, Reporte del clima en México, Año 6, Numero 5. Mayo del 2016

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). México, Pobreza 2014 Oaxaca. 2015.

Consejo Regulador del mezcal (CRM) informe 2017.

Cortés, L. L., Duarte, S. G., Lángo, E. M., & Durán, E. G. (2010). DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN. Simposio de Metrología.

Cortés, L. L., Duarte, S. G., González O. R., & Durán, E. G. (2014). CAPACIDADES DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN EL CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA. Simposio de Metrología.

Cortés, M. C. I. (2009). *Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo de Agave angustifolia Haw, residuo proveniente del proceso de la producción artesanal del mezcal*. Tesis de Maestría. México. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional.

Darsana, P., Abraham, R., Joseph, A., Jasheela, A., Binuraj, P. R., & Sarma, J. (2016). Development of Coir-fibre Cement Composite Roofing Tiles. *Procedia Technology*, 24, 169-178.

Gómez Guerrero, A. V. (2014). "Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza de *Agave angustifolia* Haw generada como residuo en la elaboración de mezcal". Tesis de Maestría, Ingeniería, CIIDIR Oaxaca IPN.

Gutiérrez, G. A., Altamirano, G. Z., & Urrestazaru, M. (2012). Maguey bagasse waste as sustainable substrate in soilless culture by melon and tomato crop. *Journal of plant Nutrition* , 2135-2144.

Hidalgo-Reyes, M. (2015). Desarrollo y caracterización mecánica de un material a base de fibras de *Agave angustifolia* Haw, para elaborar un envase biodegradable para frutos de papaya (*carica papaya*). Tesis de maestría, CIIDIR Oaxaca IPN.

Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 65-70.

Khedari, J., Watsanasathaporn, P., & Hirunlabh, J. (2005). Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. *Cement and concrete composites*, 27(1), 111-116.

Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Kosmatka H. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, EU, Portland Cement Association.

Macías Almazán, A. (2015). Investigación, desarrollo e innovación de compósitos de fibras naturales aglutinados con cemento portland ordinario.

Metha K., & Monteiro P. (1998). *Concreto, estructura, propiedades y materiales*. México: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C.

MONTES BERNABE, J. L. (2009). *ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FIBRA DE BAGAZO DE Agave angustifolia Haw EN LA RESISTENCIA A FLEXION Y COMPRESION DEL ADOBE COMPACTADO*. Tesis de maestría, CIIDIR Oaxaca IPN: 152.

Morrissey, F. E., Coutts, R. S. P., & Grossman, P. U. A. (1985). Bond between cellulose fibres and cement. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 7(2), 73-80.

Neville, A. M. (1995). *Tecnología del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.

Norma ASTM C 109/C 109M-05. Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (Usando 2-in o [50mm] muestras de cubos)

Norma ASTM C 270 – 07. Especificación estándar para Mortero para la Unidad de mampostería

Onésippe, C., Passe-Coutrin, N., Toro, F., Delvasto, S., Bilba, K., & Arsène, M. A. (2010). Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: thermal considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(4), 549-556.

Osindky, D., & Stellman, J. (2000). Minerales y Productos Químicos para la Agricultura. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el trabajo*.

Paramasivam, P., Nathan, G. K., & Gupta, N. D. (1984). Coconut fibre reinforced corrugated slabs. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(1), 19-27.

Pettersen, R. C. (1984). The chemical composition of wood.

Ramakrishna, G., Sundararajan, T., & Kothandaraman, S. (2010). Evaluation of durability of natural fibre reinforced cement mortar composite-a new approach. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(6), 44-51.

Ramaswamy, H. S., Ahuja, B. M., & Krishnamoorthy, S. (1983). Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5(1), 3-13.

Roma, L. C., Martello, L. S., & Savastano, H. (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*, 22(4), 668-674.

Salas, J., Alvarez, M., & Veras, J. (1986). Lightweight insulating concretes with rice husk. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8(3), 171-180.

Saliba, E. D. O. S., Rodriguez, N. M., de Morais, S. A. L., & Piló-Veloso, D. (2001). Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. *Ciência rural*, 31(5), 917-928.

Silva-Perez, L. M. (2015). Innovación de un material biocompuesto para tapones de bebidas espirituosas, utilizando fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw. Tesis de maestría, CIIDIR Oaxaca IPN.

Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., England, G. L., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement and concrete composites*, 25(2), 185-196.

Toledo Filho, R. D., de Andrade Silva, F., Fairbairn, E. M. R., & de Almeida Melo Filho, J. (2009). Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2409-2420.

Tonoli, G. H. D., Joaquim, A. P., Arsene, M. A., Bilba, K., & Savastano Jr, H. (2007). Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(2), 149-156.

## ANEXO

### PRODUCTIVIDAD DEL ESTUDIANTE.

El Ing. Andy Alfonso Olivera, durante su formación:

Fue aceptado en la convocatoria de Proyectos de Desarrollo Tecnológico o Innovación para alumnos, IPN, 2015, con el tema: “Diseño y construcción de una máquina lavadora de bagazo del *Agave Angustifolia* Haw, residuo de la destilación del mezcal, para la obtención de fibras”.

Participó como jurado calificador en el “Concurso Nacional de Prototipos 2017” en su fase estatal celebrado en el CETIS N° 124, Tlacolula de Matamoros, del 23 al 24 de marzo de 2017.

Participó como ponente en la conferencia: “Distribución de planta en el diseño y planeación de instalaciones” a la comunidad estudiantil de la DGETI en el estado de Oaxaca, dentro de la Semana de Vinculación 2017, el día 22 de mayo de 2017.

Participó como ponente en la conferencia: “Importancia de la logística en ingeniería industrial” a la comunidad estudiantil de la DGETI en el estado de Oaxaca, dentro de la Semana de Vinculación 2017, el día 5 de junio de 2017.

Impartió la conferencia: “Estudio mecánico y térmico de fibras de bagazo de agave como refuerzo en un material biocompuesto en forma de teja” como parte de las actividades del Seminario Intersemestral de la Academia de Ingeniería de la Maestría y Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. 08 de junio de 2017.

Fue aceptado en la convocatoria de Proyectos de Desarrollo Tecnológico o Innovación para alumnos, IPN, 2017, con el tema “Diseño y construcción de un molino de martillos para triturar fibras de agave”.

Realizó una estancia de estudios para medir la conductividad térmica de materiales biocompuestos en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) en Querétaro, dirigido por el Dr. Leonel Lira Cortés, del 9 de octubre al 10 de noviembre del 2017.

Impartió la conferencia: “Biocompuesto cemento-tepexil, reforzado con fibras de agave que actúa como mortero ligero” en el XXV Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, en el Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, el día 13 de octubre de 2017.

Participó con póster el tema: “Diseño y construcción de un molino de martillos para triturar fibras de agave” en el “5° Encuentro para Innovadores en el IPN 2017” realizado en la Sala Circular de la Unidad Politécnica para el Desarrollo y la Competitividad Empresarial (UPDCE), los días 23 y 24 de noviembre de 2017.

Fue seleccionado y aceptado el tema: “Biocompuesto cemento-tepexil, reforzado con fibras de agave que actúa como mortero ligero” Andy A. Olivera, Magdaleno Caballero Caballero, Rafael Alavéz Ramírez, José L. Montes Bernabé, para su publicación en un volumen especial de la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, en el próximo año (2018).

Participó como jurado calificador en la “Aldea Científica Oaxaca 2017” en su fase estatal celebrado en el Fortín Plaza, Oaxaca, los días 29 y 30 de noviembre de 2017.