



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Campo de conocimiento: Tecnología

Polímeros con fibras naturales como fase de refuerzo

Aplicaciones arquitectónicas

Tesis

Que para optar por el grado de:

Maestría en Arquitectura

Presenta:

Luis Octavio Ríos Adame

Tutor principal:

Dr. Humberto Acedo Espinoza - Facultad de arquitectura

Comité Tutor

Dr. Alberto Muciño Vélez - Facultad de arquitectura

M. en Arq. Leonardo Zeevaert Alcántara - Facultad de arquitectura

M. en D.I. Tamara León Camacho - Facultad de arquitectura

**M. en C. Sergio Alfonso Martínez Gonzales – Facultad de Estudios Superiores
Aragón**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Director de Tesis

Dr. Humberto Acedo Espinoza

Comité Tutor

Dr. Alberto Muciño Vélez

M. en Arq. Leonardo Zeevaert Alcántara

M. en D.I. Tamara León Camacho

M. en C. Sergio Alfonso Martínez Gonzales

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, con especial atención al programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la Facultad de Arquitectura por brindarme la oportunidad ser parte de su matrícula.

Al Doctor Humberto Acedo Espinoza, por su valiosa asesoría y aportaciones.

Al Doctor Alberto Muciño Vélez por su tiempo y dirección.

A la Maestra Tamara León Camacho por sus contribuciones.

Al M. en C. Sergio Alfonso Martínez Gonzales y Al Maestro Zeevaert Alcántara por formar parte de este proyecto.

A la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Culhuacán, del Instituto Politécnico Nacional, con especial atención al Ing. Juan Francisco Fortis, por proveer las herramientas y asesoría necesarias para llevar a cabo la etapa experimental de esta investigación

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que, a través su apoyo, hizo posible el desarrollo y culminación de este trabajo

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	VII
CAPÍTULO 1 LAS FIBRAS NATURALES PARA REFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS.....	01
1.1 Composición y estructura de las fibras naturales.....	01
1.2 Fibras naturales viables para el refuerzo de materiales compuestos.....	02
1.2.1 El henequén.....	04
1.3 Ventajas y desventajas de la utilización de las fibras naturales.....	05
1.4 Factores que afectan la calidad de las fibras naturales.....	06
1.5 Análisis comparativo entre fibras naturales y sintéticas.....	07
CAPÍTULO 2 POLÍMEROS COMO MATRICES PARA MATERIALES COMPUESTOS.....	10
2.1 Polímeros termofijos y termoplásticos.....	10
2.2 Tipos de polímeros termofijos.....	12
2.3 Biopolímeros.....	13
2.4 Comportamiento Esfuerzo-Deformación.....	13
2.5 Temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea.....	14
CAPÍTULO 3 POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES.....	15
3.1 Adhesión matriz-refuerzo.....	15
3.2 Disposición y arreglos del refuerzo.....	15
3.3 Efectos de la humedad sobre los polímeros reforzados con fibras naturales.....	18
3.4 Propiedades mecánicas.....	19
3.5 Intemperización.....	20
3.6 Resistencia contra el fuego.....	20
3.7 Tratamiento y modificación de las fibras.....	22
3.8 Procesos de manufactura.....	23
3.9 Potenciales.....	23
3.9.1 Económicos.....	23

3.9.2 Ambientales.....	23
CAPÍTULO 4 APLICACIONES CONSTRUCTIVAS DE LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES.....	25
4.1 Refuerzo de elementos de concreto con polímeros reforzados.....	25
4.2 Polímeros con fibras naturales como material de refuerzo para el concreto.....	28
4.3 Columnas y vigas celulares.....	34
CAPÍTULO 5 EXPERIMENTACIÓN.....	37
5.1 Diseño del experimento.....	37
5.2 Materiales y procesos utilizados en la fabricación de las probetas.....	37
5.2.1 Matriz polimérica.....	37
5.2.2 Fibras naturales utilizadas como fase de refuerzo del material.....	39
5.2.3 Tratamiento y modificación de las fibras.....	39
5.2.4 Proceso de fabricación de las probetas.....	40
5.3 Laboratorio y equipo utilizado.....	41
5.4 Normas implementadas.....	42
5.4.1 Norma ASTM D3039 2002 Método estándar para la obtención las propiedades a tensión de materiales compuestos de matriz polimérica.....	42
5.4.2 Norma ASTM D790 2002 Método estándar para la obtención las propiedades a flexión de plásticos con y sin refuerzo y material de aislamiento eléctrico.....	46
5.5 Pruebas de resistencia a la flexión.....	47
5.5.1 Resultados de las pruebas de resistencia a la flexión.....	48
5.6 Prueba de resistencia a la tensión.....	52
5.6.1 Resultados de las pruebas de resistencia a tensión.....	53
5.7 Análisis y Discusión de los resultados.....	58
5.7.1 De las pruebas de resistencia a flexión.....	58
5.7.2 De las pruebas de resistencia a tensión.....	62
6. CRITERIOS DE ANÁLISIS A PARTIR DE LOS EXPERIMENTOS.....	64

CONCLUSIONES.....	68
REFERENCIAS.....	72
ANEXOS.....	74
Anexo 1 Ficha Técnica Resina Epoxica Epolam 2015.....	74
Anexo 2 Las fibras naturales en el concreto.....	76

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura de una fibra natural (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013)	1
Ilustración 2. Configuración de fibras naturales (en este caso lino) en (a) tapete, (b) conjuntos de fibras sin torsión, (c) tela, (d) monofilamento, (e) Hilo. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)	3
Ilustración 3. Vista longitudinal y sección transversal de una fibra de sisal (Kicinska-Jakubowska, Bogacz, & Zimniewska, 2012)	4
Ilustración 4. (1) Urdimbre (2) Trama. (Hollen, Langford, & Saddler, 1987)	16
Ilustración 5. Ejemplo de cómo se cruzan los hilos en el ligamento tafetán (Hollen, Langford, & Saddler, 1987)	17
Ilustración 6. Ejemplo de tejido de sarga (Hollen, Langford, & Saddler, 1987)	18
Ilustración 7. Reforzado a cortante con PRFs, modalidades y longitudes efectivas. (a) 4 lados, (b) 3 lados y (C) tres lados (Bank, 2006)	27
Ilustración 8. Variables geométricas para refuerzo a cortante (Bank, 2006)	27
Ilustración 9. Probetas probadas a flexión (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013)	32
Ilustración 10. Vista esquemática de tubos FFRP con anillos para evitar el deslizamiento (Yan & Chouw, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete, 2013)	33
Ilustración 11. Geometría de los paneles y vigas celulares (Burgueño, y otros, 2004)	34
Ilustración 12. Resina epoxica Epolam 2105, endurecedor Epolam 2015 y desmoldante 841, todos marca Axson	38
Ilustración 13. fibras de henequén en (a) tela (b) fibras en un solo sentido	39
Ilustración 14. Ejemplo de molde y capas de fibras listas para recibir la resina epoxica	41
Ilustración 15. Maquina universal	41
Ilustración 16. Vernier digital Park Tool	42
Ilustración 17. Rangos aceptables de radios de soportes y nariz de carga. (A) Radio mínimo 3.2 mm (b) Radio máximo 1.6 veces el espesor de la probeta; radio máximo nariz de carga= 4 veces el espesor de la probeta	46
Ilustración 18 ensayo a flexión de probetas de resina epoxica con refuerzo de fibras de henequén	47
Ilustración 19. Ensayo a tensión de probetas de resina epoxica con refuerzo de fibras de henequén	52
Ilustración 20. Probetas del lote 1 después de ser ensayadas a tensión	53
Ilustración 21. Probetas del lote 2 después de ser ensayadas a tensión	55
Ilustración 22. Efecto del tamaño del agregado en la estructura y distribución de la fibra en un cuadrado de lados iguales a la longitud de la fibra (40mm) (Brandt, 2009)	77

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Composición química de varias fibras naturales (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013)	2
Gráfica 2. Volumen de producción de henequén 2000-2009 (miles de ton) (Financiera Rural, 2011).....	4
Gráfica 3. Comparativa de costo por peso entre fibras de vidrio (vidrio-E) y fibras naturales (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)	7
Gráfica 4. Comparación de costo por unidad de longitud (capaz de resistir una carga de 100kN) entre fibras naturales y de vidrio (Dittember & GangaRao, 2012).....	9
Gráfica 5. Comportamiento esfuerzo deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B) y con elevada elasticidad (curva C) (Callister, 2009).	14
Gráfica 6. Curvas de esfuerzo deformación para fibras de lino no tratadas y químicamente tratadas (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).	21
Gráfica 7. Respuesta carga-deformación de una viga de concreto fortalecida con PRFs. (Bank, 2006).....	26
Gráfica 8. Curva de tensión- deformación de los polímeros reforzados con lino (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).....	29
Gráfica 9. Curva de flexión- deformación de los FRP reforzados con lino (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).....	29
Gráfica 10. Curva de comportamiento del PRFL-CS bajo esfuerzos de compresión (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).	30
Gráfica 11. Curva de comportamiento del PRFL-CRFC bajo esfuerzos de compresión (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).....	30
Gráfica 12. Curva de deflexión a medio claro del PRFL-CRFC (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).....	31
Gráfica 13. Curva de deflexión a medio claro del PRFL-CS (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013). ..	31
Gráfica 14. Comparación de desempeño de los bio-paneles (Burgueño, y otros, 2004) .	36
Gráfica 15. Curvas esfuerzo-deformación típicas.....	45
Gráfica 16. Carga-deflexión probeta FL-T-1	49
Gráfica 17. Carga-deflexión probeta FL-T-2.....	49
Gráfica 18. Carga-deflexión probeta FL-T-3.....	50
Gráfica 19. Carga-deflexión probeta FL-C-1	51
Gráfica 20. Carga-deflexión probeta FL-C-2	51
Gráfica 21. Carga-deflexión probeta FL-C-3	51
Gráfica 22. Esfuerzo-deformación Probeta T-FTT-1	54
Gráfica 24. Esfuerzo-deformación probeta T-FTT-2.....	54
Gráfica 25. Esfuerzo-deformación probeta T-FTT-3.....	54
Gráfica 26. Esfuerzo-deformación probeta T-FNT-1	56
Gráfica 27. Esfuerzo-deformación probeta T-FNT-2	56
Gráfica 28. Esfuerzo-deformación probeta T-FNT-3	56

Grafica 29. Esfuerzo deformación probeta T-FNC-1	57
Gráfica 22. Tendencia de incremento de resistencia a la flexión según el volumen de refuerzo del compuesto epoxi-henequén	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que afectan la calidad de la fibra en varias etapas de producción de fibras naturales (Dittember & GangaRao, 2012).....	7
Tabla 2. Propiedades físicas y de mecánicas de fibras naturales y de vidrio (Yan, Chou, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)	8
Tabla 3. Propiedades de los polímeros termoplásticos usados comúnmente en los compuestos con fibras naturales (Yan, Chou, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).....	11
Tabla 4. Propiedades de los polímeros termofijos usados comúnmente en los compuestos de fibras naturales. (Yan, Chou, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)	11
Tabla 5. Propiedades mecánicas del tubo de polímero reforzado con tela de lino (Yan & Chou, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube ancaseid coir fibre reinforced concrete, 2013)	28
Tabla 6. Resultado de pruebas de laboratorio (Yan & Chou, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube ancaseid coir fibre reinforced concrete, 2013)	33
Tabla 7. Detalles del refuerzo de las probetas (Burgueño, y otros, 2004).....	35
Tabla 8. Resultados de las pruebas mecánicas ejecutadas (Burgueño, y otros, 2004)....	35
Tabla 9. Propiedades mecánicas de la resina epoxica utilizada	38
Tabla 10. Requerimientos geométricos de un espécimen de tensión	42
Tabla 11. Recomendaciones de geometría del espécimen para tensión	43
Tabla 12. Códigos/tipos de falla de prueba de tensión	44
Tabla 13. Descripción de las probetas ensayadas a flexión.....	48
Tabla 14. Resultados de los ensayos a flexión de la tanda 1.....	48
Tabla 15. Resultados de los ensayos a flexión de la tanda 2.....	50
Tabla 17. Descripción de las probetas ensayadas a tensión	52
Tabla 18. Resultados de los ensayos a tensión de la tanda 1	53
Tabla 19. Resultados de los ensayos a tensión a la tanda 2	55
Tabla 20. Resultados de los ensayos a tensión de la tanda 3	57
Tabla 16. Comparativa de los resultados de los ensayos a flexión	61
Tabla 21. Comparación de los resultados de los ensayos a flexión	63
Tabla 22. Comparativa de materiales utilizados comúnmente en fachadas (Elaboración propia)	66

INTRODUCCIÓN

El uso de materias primas renovables, reciclables y de bajo consumo energético en su producción como sustituto de otros materiales utilizados en la construcción que no cuentan con estas características se considera una pasó importante para lograr reducir el impacto ambiental que provoca esta industria.

Las fibras naturales presentan potencial para ser utilizadas como fase de refuerzo en materiales compuestos, los cuales a su vez pueden presentar aplicaciones constructivas.

Cuando hablamos de materiales compuestos nos referimos aquéllos elementos que se forman por la unión de dos materias primas para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos están conformados por dos fases principales:

- Fase aglutinante o matriz. Esta tendrá la función de dar forma, continuidad, cohesión al material, además de transmitir los esfuerzos y proteger a la fase de refuerzo de agentes físicos y químicos.
- Fase de refuerzo. Será la encargada de resistir y disipar los esfuerzos que se aplique sobre un material compuesto.

En matrices frágiles, como las de cemento, las fibras se introducen con el objetivo de controlar la apertura de fisuras o evitar su propagación en caso de que estas se presenten. Esto tiene el efecto de incrementar la deformabilidad, aumentar la energía que debe acumular una carga externa para que ocurra una fractura y la resistencia contra el impacto. En estos casos el volumen recomendado de fibras será 3% del volumen de la matriz.

En matrices poliméricas las fibras pueden representar hasta el 60% del volumen de la matriz, y se introducen para poder crear materiales ligeros con altas resistencias mecánicas (estas resistencias son variables y estarán directamente relacionadas con el tipo de fibra, matriz y proceso de manufactura utilizado).

Es por eso que esta investigación propone como objetivo desarrollar un material con capacidades estructurales utilizando fibras naturales como fase de refuerzo.

La fibra natural que se escogió para su estudio en esta investigación fue el henequén, por su resistencia mecánica (la literatura reporta valores de resistencia a la tensión de entre 4300 a 5700kg/cm²), bajo costo y disponibilidad.

Debido al acelerado consumo de materiales de alto impacto ambiental, el interés por la investigación y desarrollo de materiales con fibras naturales es global y está en constante crecimiento, esto se demuestra con las referencias que se incluyen en este documento, la gran mayoría publicados después del año 2010. En el 2009, México produjo 5000 toneladas de fibras de henequén, las cuales tienen un fin principalmente artesanal, pues para fines industriales las fibras sintéticas las han reemplazado. Aprovechar estos recursos e introducir materiales con menor impacto ambiental justifica el esfuerzo en producir materiales compuestos con esta fibra.

Así pues la hipótesis de investigación formulada fue la siguiente: La introducción de fibras naturales como fase de refuerzo en una matriz polimérica dará como resultado un material

con capacidades estructurales para actuar como elementos de refuerzo para piezas de concreto que estén sujetas a esfuerzos de flexión.

El polímero reforzado se utilizaría como coraza (cimbra) dentro de la cual se vertería concreto para formar un núcleo y obtener un elemento con capacidades estructurales. Cuando estos elementos se sometan a esfuerzos de flexión, bajo los cuales, como sabemos, la parte de arriba del eje neutro del elemento es sometida a compresión, mientras que la parte inferior es sometida a tensión, el concreto absorbería los esfuerzos de compresión y el polímero reforzado absorbería los esfuerzos de tensión y cortante.

La fase experimental arrojó como resultado que aunque los polímeros reforzados con fibras naturales tiene buenas propiedades mecánicas (Se pueden alcanzar hasta 2500kg/cm² de resistencia a flexión), su uso en estructuras no es viable debido a:

- Los polímeros reforzados con fibras naturales tienden a degradarse cuando son expuestos a rayos ultravioleta y la humedad, perdiendo sus propiedades mecánicas. Y aunque existen tratamientos químicos que reducen este efecto, no se tienen datos de la vida útil de este material, siendo que según las normas técnicas complementarias del reglamento de construcción del Distrito Federal, establecen que las estructuras se deben construir para tener una vida útil de mínimo 50 años.
- Estos materiales poliméricos tienen muy baja resistencia al fuego, perdiendo sus propiedades mecánicas a temperaturas tan bajas como 80°C.
- Aunque los dos puntos anteriores pueden ser corregidos mediante aditivos o capas protectoras, la realidad es que este tipo de materiales (principalmente por la matriz polimérica) no son costeables, pues se vuelven excesivamente caros en comparación con elementos de refuerzo tradicionales como son las varillas de acero.
- Finalmente, las normas técnicas complementarias del reglamento de construcción del Distrito Federal establecen que las estructuras de concreto reforzado deben tener una falla dúctil (esto se logra con el refuerzo de varillas de acero) y en la fase experimental se observó que este material tiene una falla totalmente frágil, lo que hace que no se pueda cumplir este ordenamiento.

Para llegar a estas conclusiones primero se desarrolló una etapa de investigación bibliográfica, que cuenta con cuatro unidades.

La primera unidad trata con temas de la fase de refuerzo: Fibras naturales, su composición y estructura, qué fibras naturales son viables para reforzar materiales, cómo es que su calidad se vería afectada, bajo qué condiciones pueden ser utilizadas y cómo se comparan con otras fibras sintéticas.

El segundo capítulo se ocupa de la matriz polimérica, tipos existentes, cuáles son sus propiedades y comportamiento bajo distintos esfuerzos.

En el tercer capítulo nos encontramos ya con materiales compuestos por fibras naturales y una matriz polimérica, aquí nos enfocamos en cuáles son sus propiedades, procesos de manufactura y cómo los afectan distintos tipos de factores ambientales y de compatibilidad. Además se presentan posibles soluciones para esta problemática.

Y finalmente se presenta la unidad 4 con ejemplos de propuestas de aplicaciones y usos de este tipo de materiales.

Una vez terminada la investigación bibliográfica, se procedió a realizar la etapa de investigación. Esta etapa a su vez se divide en dos partes: desarrollo del material polimérico con fase de refuerzo de fibras naturales y en segundo lugar ensayos de propiedades mecánicas a dicho material.

En la primera etapa se escogió la fibra a utilizar basándonos en tres variables: disponibilidad, propiedades mecánicas y costo. La fibra de henequén fue la que cumplió con estos parámetros. También se eligió una matriz polimérica, con base en sus propiedades mecánicas, trabajabilidad, estabilidad química y propiedades adhesivas. Con las materias primas seleccionadas, fue necesario elegir el arreglo que las fibras naturales deberían llevar dentro de la matriz y los tratamientos químicos para mejorar, principalmente, sus propiedades de absorción de humedad y adhesión matriz-refuerzo. El material fue fabricado por procesos manuales.

Con el material fabricado se prosiguió a la siguiente etapa: Ensayos de resistencia a esfuerzos donde los materiales fueron sometidos a dos ensayos principales: tensión y flexión, todas las pruebas fueron realizadas bajo estándares internacionales.

Y aunque los resultados arrojaron que la hipótesis de investigación no se validó, de dichos resultados podemos concluir que el material polimérico con fase de refuerzo de fibras naturales desarrollado en esta investigación puede tener aplicaciones principalmente arquitectónicas, en donde una falla no represente peligros para los usuarios.

CAPÍTULO 1 LAS FIBRAS NATURALES PARA REFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS

1.1 Composición y estructura de las fibras naturales

Las fibras naturales derivadas de plantas, consisten principalmente de fibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina. Cada fibra posee una estructura arreglada en capas, una capa primaria y tres secundarias. La capa media de las paredes secundarias determina las propiedades mecánicas de la fibra. En la siguiente ilustración se puede apreciar la estructura de una fibra natural:

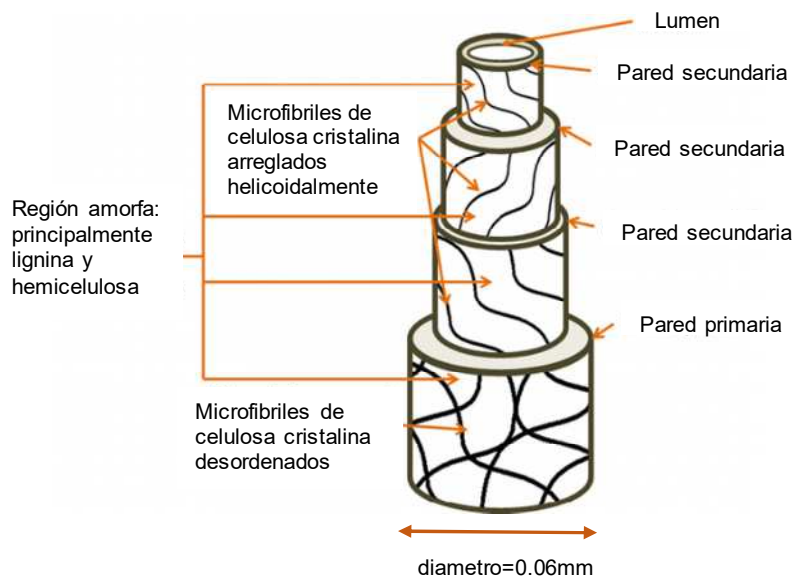
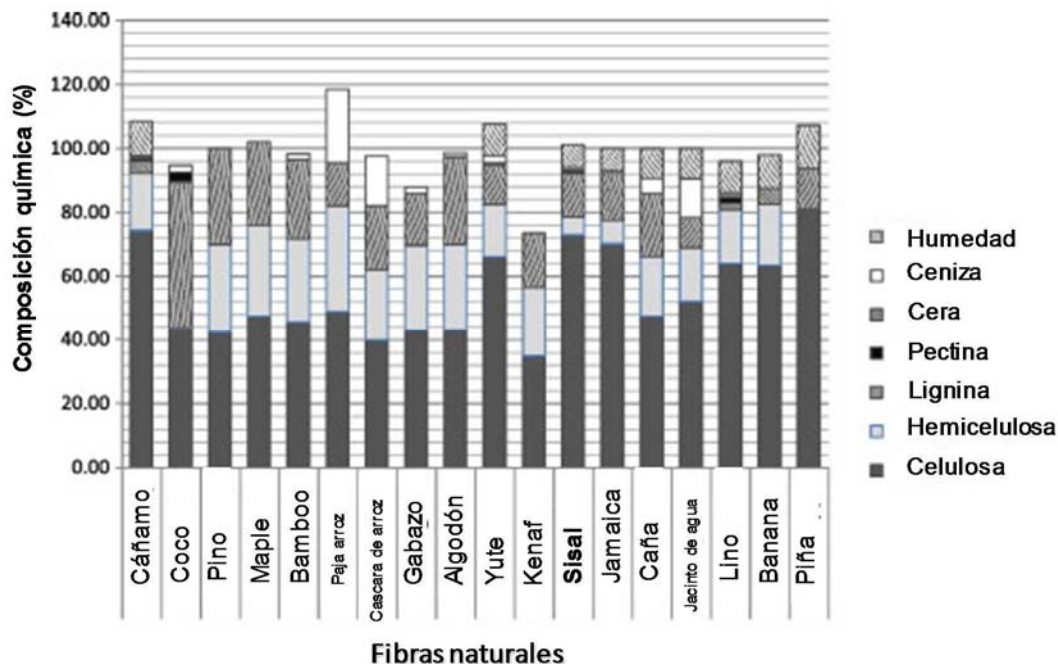


Ilustración 1. Estructura de una fibra natural (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013)

Cada capa está hecha de hasta tres componentes, que son celulosa, hemicelulosa y lignina. Otros componentes presentes en las fibras incluyen, pectinas, aceites y ceras. En las fibras naturales también se puede encontrar lumen (es el espacio interior de una estructura tubular, como en una arteria o intestino), lo que las hace una estructura hueca a diferencia de las fibras sintéticas. En la siguiente tabla podemos apreciar la composición química de varias fibras naturales:



Gráfica 1. Composición química de varias fibras naturales (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013)

1.2 Fibras naturales viables para el refuerzo de materiales compuestos

El año 2010, en la Unión Europea, se utilizaron 315 000 toneladas de fibras naturales, que es el equivalente al 13% del total de las materias primas (Fibras de vidrio, carbón y naturales) utilizadas para el refuerzo de materiales compuestos. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

Las fibras naturales utilizadas para crear materiales compuestos son las siguientes (Mohnty, Misra , & Drzal, 2005):

1. Fibras de plantas
 - Lino
 - Cártamo
 - Yute
 - Kenaf
 - Ramio
 - Ortiga mayor (hiedra venenosa)
 - Bamboo
2. Fibras de hojas
 - Sisal o Henequén
 - Hoja de piña
 - Palma de aceite
3. Fibras de semillas
 - Algodón
4. Fibras de frutas
 - Fibras de coco

- 5. Fibras de tallos
 - Fibras de paja
- 6. Pastos y caña
 - Caña
 - Bagazo de caña
 - Pastos
 - Bagazo de caña

Otras fibras naturales pueden provenir de origen animal (lana) o mineral (como el asbesto, que su utilización ha sido prohibida casi mundialmente por los riesgos contra la salud que implica).

Las fibras naturales pueden ser utilizadas de distintas maneras, como ejemplo tenemos la siguiente ilustración:

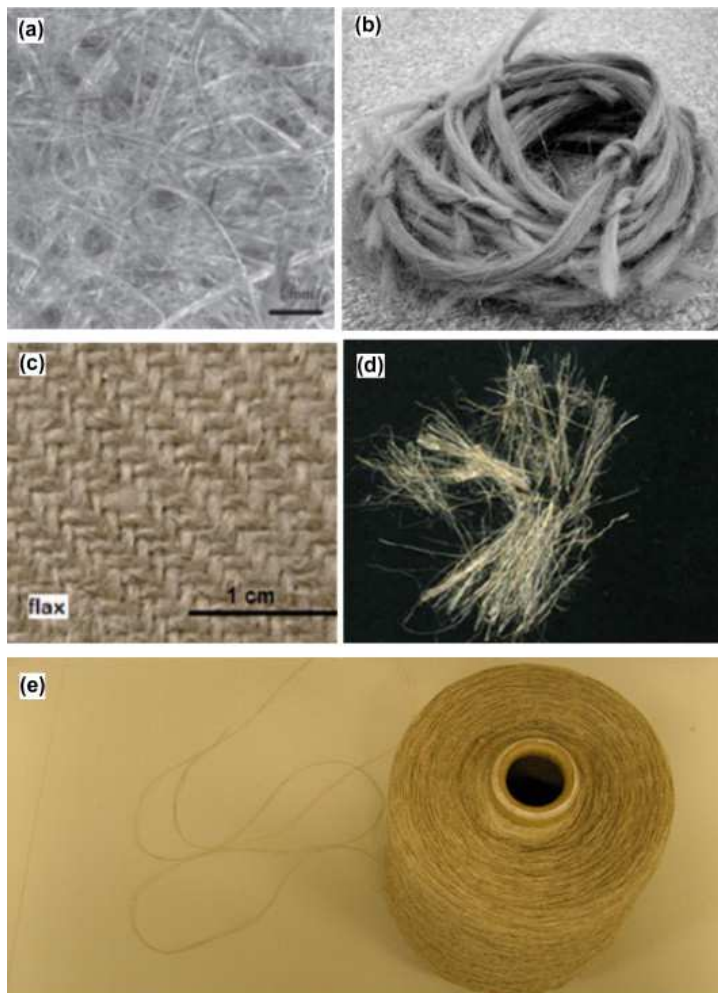


Ilustración 2. Configuración de fibras naturales (en este caso lino) en (a) tapete, (b) conjuntos de fibras sin torsión, (c) tela, (d) monofilamento, (e) Hilo. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

1.2.1 El henequén

El henequén es una planta monocotiledónea, del género de los agaves, perteneciente a la familia *Agavaceae*. Esta es una planta resistente que no requiere gran atención. El principal consumo es industrial, en la fabricación de cuerdas, sogas, sacos, hilos, entre otros.

La principal diferencia morfológica con la especie del **sisal**, es la presencia de espina en el borde de las hojas, así como que el sisal posee fibras más delgadas (Financiera Rural, 2011). En la siguiente ilustración, se pueden apreciar micrográficas de las fibras de sisal:

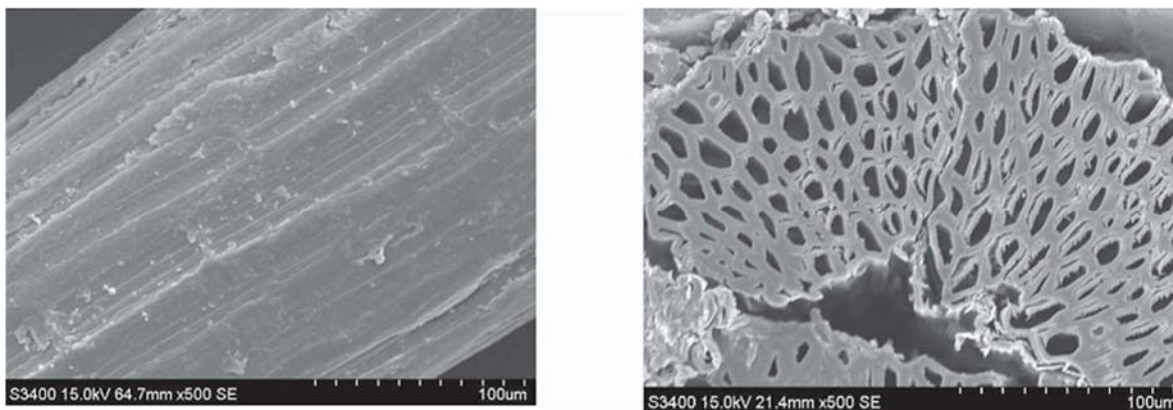
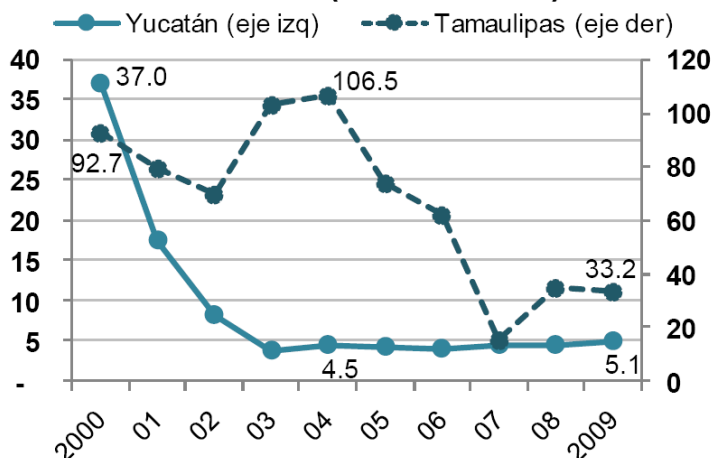


Ilustración 3. Vista longitudinal y sección transversal de una fibra de sisal a través de un microscopio electrónico de barrido (Kicinska-Jakubowska, Bogacz, & Zimniewska, 2012)

En México, el henequén se produce en dos estados: Yucatán y Tamaulipas, la aportación de cada estado se puede apreciar en la siguiente gráfica:

Volumen de Producción de Henequén 2000-2009 (miles de ton)



Gráfica 2. Volumen de producción de henequén 2000-2009 (miles de ton) (Financiera Rural, 2011)

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, en México ha declinado considerablemente la producción de este tipo de fibras. Esto se puede atribuir a una serie de problemas con los que se ha encontrado la industria del sisal y el henequén (Financiera Rural, 2011):

- La producción de sucedáneos sintéticos, como el propileno, ha desplazado el uso de esta fibra natural, los sustitutos de polipropileno se apoderaron del 55% del mercado del sisal entre 1970 y 1980.
- El cambio tecnológico en las otras industrias ha provocado cada vez menor utilización de cuerdas hechas de sisal y henequén, a su vez, la falta de investigación y desarrollo en la producción de la fibra ha tenido como resultado una reducción en la demanda.
- En muchos casos, el sisal y el henequén son producidos de la misma forma que hace 50 años.
- Existe una baja utilización del cultivo, ya que solo se aprovecha la fibra de las hojas de agave, que representan apenas el 2% de la planta, el resto se constituye como biomasa y fibras cortas que son desperdiciadas y en el mayor de los casos quemadas.

La producción mundial de sisal y henequén está estimada en 300 mil toneladas anuales, valoradas en 75 millones, el mayor productor es Brasil (con un 40% de la producción anual, lo que equivale a 120,000 ton), México produce alrededor del 1.6% mundial, equivalente a 5000 ton.

El precio de la fibra de sisal a nivel internaciones, en el año 2009, se encontraba en alrededor de US\$1,200 a \$1,300 por tonelada, este precio guarda relación con la tendencia del precio del propileno, su principal sustituto sintético y por lo tanto con la tendencia del petróleo (Financiera Rural, 2011).

1.3 Ventajas y desventajas de la utilización de las fibras naturales

Las ventajas que las fibras naturales tiene sobre las artificiales (Zhoue, Hamidreza, Dong, Olayinka, & Fan, 2013):

- Abundancia y por lo tanto bajo costo
- Biodegradabilidad
- Flexibilidad y suavidad en el procesado y por lo tanto menos desgaste de maquinaria
- Riesgo contra la salud mínimos
- Baja densidad
- Relación de aspecto de la fibra deseable
- Módulo de tensión y flexión relativamente altos
- Las fibras naturales requieren solo de un 20% a un 40% de energía de producción comparadas con las fibras sintéticas
- Tiene buenas propiedades acústicas y térmicas

Debido a lo anterior, las mayores ventajas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales son:

- Peso específico bajo, lo que resulta en una fuerza específica más alta y una rigidez mayor comparado con compuestos reforzados con fibra de vidrio
- Recurso renovable con producción que requiere poca energía, CO₂ es utilizado mientras oxígeno es devuelto al ambiente
- Atmósfera de producción más amigable con mejores condiciones de trabajo y por lo tanto las irritaciones cutáneas y respiratorias son reducidas
- Alta resistencia eléctrica
- Reciclaje térmico posible
- Buenas propiedades de aislamiento térmico-acústico
- Biodegradabilidad

También se deben listar las desventajas que presentan las fibras naturales contra las sintéticas, que son: (Mohnty, Misra , & Drzal, 2005):

- Variabilidad enorme
- Baja resistencia a la humedad
- Baja resistencia contra el fuego
- Durabilidad reducida
- Variación en calidad y precio
- Dificultad al utilizar prácticas manufactureras establecidas cuando se les compara con compuestos sintéticos.

Además las fibras naturales tienen una temperatura de degradación entre 180-230°C (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013), por lo que no se pueden emplear como refuerzo en matrices que deban ser procesadas a temperaturas mayores a las mencionadas.

1.4 Factores que afectan la calidad de las fibras naturales

A diferencia de las fibras sintéticas, las fibras naturales tienen una variabilidad significativamente mayor en sus propiedades mecánicas (la literatura reporta valores de resistencia a la tensión de entre 4300 a 5700kg/cm² para fibras de henequén).

Las propiedades de las fibras de una especie pueden variar dependiendo del área de crecimiento, clima y edad de la planta, además las propiedades de las fibras naturales pueden cambiar según el proceso utilizado para degradar la planta hasta fibras. (Mohnty, Misra , & Drzal, 2005).

Existen varias etapas de producción de las fibras naturales y en cada una de ellas existen varios factores que pueden influenciar la calidad de la fibra, estos factores se resumen en la siguiente tabla:

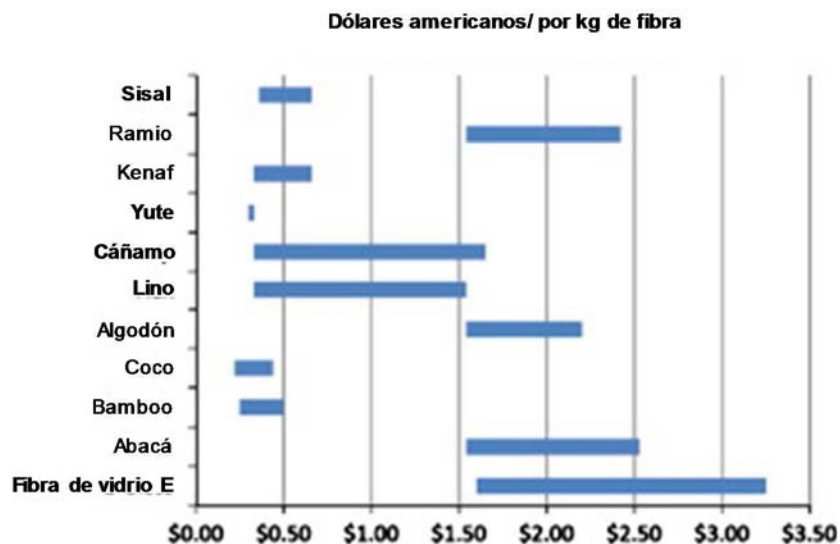
Etapa	Factores que afectan la calidad de la fibra
Crecimiento de la planta	Especie de la planta Cultivos Ubicación de la siembra Ubicación de la fibra en la planta Clima local
Cosecha	Madurez de la fibra que afecta: -Espesor de la pared celular -Tosquedad de las fibras -Adherencia entre las fibras y la estructura que las rodea
Extracción de la fibra	Método de enriado Método de decorticación
Suministro	Condiciones de transporte Condiciones de almacenamiento Edad de la fibra

Tabla 1. Factores que afectan la calidad de la fibra en varias etapas de producción de fibras naturales (Dittember & GangaRao, 2012).

Debido a que las fibras naturales son altamente hidrofílicas, su módulo de tensión es altamente dependiente de la humedad relativa en el ambiente. Los módulos tanto estáticos como dinámicos, decrecen remarcablemente con al aumento en la humedad relativa hasta llegar a un punto en que cualquier esfuerzo causará la falla total de la fibra.

1.5 Análisis comparativo entre fibras naturales y sintéticas

Como primer acercamiento, podemos comparar las fibras naturales con las de vidrio con costo (dólares americanos) y por peso (kilogramos). Para este fin se presenta la siguiente gráfica:



Gráfica 3. Comparativa de costo por peso entre fibras de vidrio (vidrio-E) y fibras naturales (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

En la gráfica anterior podemos apreciar que la mayoría de las fibras naturales se encuentran en un rango de precio menor que las fibras de vidrio-E.

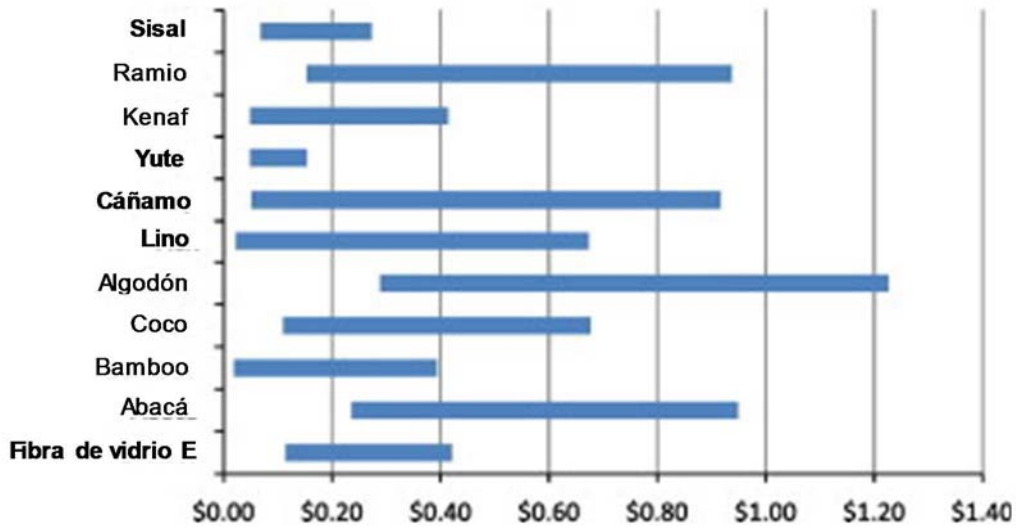
Por otra parte, también se deben comparar las propiedades mecánicas entre las fibras de vidrio y las fibras naturales, para lo cual utilizamos la siguiente tabla:

Tipo de fibra	Diámetro (µm)	Densidad relativa (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)	Módulo elástico (Gpa)	Módulo específico (Gpa cm ³ /g) x	Elongación en falla (%)
Vidrio-E	<17	2.5-2.6	20000-35000	70-76	29	1.8-4.8
Abacá	-	1.5	4000-980	6.2-20	9	1.0-10
Alfa	-	0.89	350	22	25	5.8
Bagazo	10-34	1.25	2220-2900	17-27.1	18	1.1
Bamboo	25-40	0.6-1.1	1400-8000	11-32	25	2.5-3.7
Banana	12-30	1.35	5000	12	9	1.5-9
Coco	10-460	1.15-1.46	950-2300	2.8-6	4	15-51.4
Algodón	10-45	1.5-1.6	2870-8000	5.5-12.6	6	3-10
Curagua	7-10	1.4	870-11500	11.8-96	39	1.3-4.9
Lino	12-600	1.4-1.5	3430-20000	27.6-103	45	1.2-3.3
Cáñamo	25-600	1.4-1.5	2700-9000	23.5-90	40	1-3.5
Henequén	-	1.2	4300-5700	10.1-16.3	11	3.7-5.9
Isora	-	1.2-1.3	5000-6000	-	-	5-6
Yute	20-200	1.3-1.49	3200-8000	30	30	1-1.8
Kenaf	-	1.4	2230-9300	14.5-53	24	1.5-2.7
Ortiga	-	-	6500	38	-	1.7
Palma aceite	-	0.7-1.55	1500-5000	80-248	0.5-3.2	17-25
Piasava	-	1.4	1340-1430	1.07-4.59	2	7.8-21.9
PALF	20-80	0.8-1.6	1800-16270	1.44-82.5	35	1.6-14.5
Ramina	20-80	1.0-1.55	4000-10000	24.5-128	60	1.2-4.0
Sisal	8-200	1.33-1.5	3630-7000	9.0-38	17	2.0-7.0

Tabla 2. Propiedades físicas y de mecánicas de fibras naturales y de vidrio (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

Dado que las fibras naturales tienen menor densidad y resistencia que las fibras de vidrio, una mejor forma de ver la comparación es como lo muestra la gráfica 4, en esta se indica el rango de valores de costo por cantidad de material de fibra capaz de soportar la carga de 100kN. Esta tabla ilustra de una mejor manera que solo algunas fibras naturales serán capaces de competir con las fibras de vidrio, particularmente el yute, sisal, bambú, lino y el cáñamo.

Dólares americanos/ por cantidad de fibras capaces de resistir una carga de 100kN



Gráfica 4. Comparación de costo por unidad de longitud (capaz de resistir una carga de 100kN) entre fibras naturales y de vidrio (Dittember & GangaRao, 2012).

También se debe hacer notar que la producción de fibras naturales, requiere, en promedio, 60% menos energía que la fabricación de fibra de vidrio (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013).

CAPÍTULO 2 POLÍMEROS COMO MATRICES PARA MATERIALES COMPUESTOS

2.1 Polímeros termofijos y termoplásticos

El término polímero es utilizado para describir un arreglo de moléculas extremadamente largas, llamadas macromoléculas, que consisten de unidades repetitivas, o cadenas en que los átomos se mantienen unidos por enlaces covalentes. El término polímero es generalmente utilizado para describir materiales orgánicos de este tipo, sin embargo, también puede ser utilizados para describir materiales inorgánicos.

Dos grupos principales de polímeros existen en la actualidad. Polímeros termofijos y polímeros termoplásticos. Se distinguen uno de otro por como las cadenas poliméricas están conectadas cuando el polímero se encuentra en estado sólido. Los polímeros termofijos son reticulados, lo que significa que sus moléculas se unen para formar una red tridimensional continua, mediante átomos unidos fuertemente por enlaces covalentes. Los polímeros termoplásticos no son reticulados, y sus cadenas moleculares se sostienen gracias a débiles fuerzas de Van der Waals o uniones de hidrógenos. Esto afecta las propiedades físicas y mecánicas de los polímeros. Debido al reticulado, la estructura de un polímero termofijo es fijada cuando se solidifica o cura durante el proceso de polimerización, y no puede ser calentado, ablandado y reformado en una geometría diferente. Por otra parte, los polímeros termoplásticos no se fijan y permanecen plásticos, así las moléculas pueden “fluir” cuando el polímero sólido de este tipo es calentado hasta el punto que reblandece y puede ser moldeado a una forma diferente que mantendrá cuando se enfríe. (Bank, 2006)

Esto quiere decir que los polímeros termoplásticos se licúan cuando alcanzan su temperatura de fusión, mientras, que los polímeros termofijos comienzan a descomponerse cuando alcanzan su temperatura de fusión.

Los termoplásticos tienen muchas ventajas sobre los polímeros termoestables en la fabricación de los bio-compuestos, como bajo procesamiento, flexibilidad de diseño y facilidad de moldear piezas complejas. Sin embargo, el desarrollo de bio-compuestos con termoplásticos está restringido por la temperatura de procesamientos. Generalmente la temperatura debería de ser debajo de los 230°C para evitar la degradación de las fibras naturales, a estos parámetros se ajusta el PP y el PE. Dentro de los termoplásticos el PP es el más utilizado en los bio-compuestos debido a su baja densidad, buenas propiedades mecánicas, relativa resistencia a altas temperaturas, excelente procesabilidad y buena resistencia al impacto. En la siguiente tabla, se pueden apreciar los polímeros termoplásticos más utilizados para la creación de materiales compuestos y sus propiedades:

Propiedades	PP	LDPE	HDPE	PS
Densidad (g/cm ³)	0.899-0.920	0.910-0.925	0.94-0.96	1.04-10.6
Absorción de agua (24 h@20°C)	0.01-0.02	<0.015	0.01-0.2	0.03-0.10
Resistencia a la tensión(kg/cm ²)	260-414	400-780	145-380	250-690
Módulo elástico (kg/cm ²)	9500-17700	550-3800	4000-15000	40000-50000
Elongación (%)	15-700	90-800	2.0-130	1-2.5
Resistencia de impacto (J/m)	21.4-267	>854	26.7-1068	1.1

PP= Polipropileno **LDPE=** Polietileno de baja densidad **HDPE=** Polietileno de alta densidad **PS=** Poliestireno

Tabla 3. Propiedades de los polímeros termoplásticos usados comúnmente en los compuestos con fibras naturales (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

Aunque los termoplásticos actualmente dominan como las matrices para las bio-fibras, actualmente más y más investigadores están inclinándose hacia los termoestables. Esto es debido a que los polímeros termoestables son mejores en algunas áreas, incluyendo: propiedades mecánicas, resistencia química, estabilidad térmica y durabilidad en general. Adicionalmente los termoestables permiten más flexibilidad en la configuración de las fibras y pueden ser procesados a temperaturas ambiente o temperaturas dentro de un rango seguro para las fibras naturales. De los termoestables, la resina epoxica es la más común. La resina epoxica ofrece desempeño mecánico elevado (Con respecto a la resistencia a la tensión y compresión) y es resistente a la degradación ambiental. Vinil-éster también es ampliamente utilizado por su excelente resistencia química, buenas propiedades térmicas (mejor resistencia a la humedad que la resina epoxi cuando se curan a temperatura ambiente) y de resistencia al impacto. En la siguiente tabla se puede apreciar ejemplos de polímeros termofijos y sus propiedades:

Propiedad	Epoxi	Polyester	Vinyl éster
Densidad (g/cm ³)	1.1-1.4	1.2-1.5	1.2-1.4
Módulo Elástico (kg/cm ²)	30000-60000	20000-45000	31000-38000
Resistencia a la tensión (kg/cm ²)	350-1000	400-900	690-830
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	1000-2000	900-2500	1000
Elongación (%)	1-6	2	4-7
Contracción al fraguado (%)	1-2	4-8	N/A
Absorción de agua (24 h@20°C)	0.1-0.4	0.1-0.3	0.1
Resistencia al impacto (J/m)	0.3	0.15-3.2	2.5

Tabla 4. Propiedades de los polímeros termofijos usados comúnmente en los compuestos de fibras naturales. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

Claramente, los polímeros termofijos presentan valores de resistencia mecánica a los esfuerzos más elevados que aquellos de los polímeros termoplásticos.

2.2 Tipos de polímeros termofijos

Estos se presentan en forma de resina. El término resina polimérica, o simplemente resina, es utilizado en la industria de los *composites* para referirse a la fase adhesiva que mantiene unidas las fibras o fase de refuerzo de un material polímero compuesto reforzado con fibras (PRF). Esta fase también se le conoce como matriz.

Las resinas poliméricas son buenos aislantes y no conducen calor o electricidad, previsto que no tengan un alto índice de porosidad. Las resinas poliméricas usualmente son consideradas materiales isotrópicos viscoelásticas. Sufren deformación por fluencia lenta bajo esfuerzos constante y se relajan bajo deformaciones o desplazamientos constantes. Las resinas poliméricas en general, no son adecuadas para su uso a temperaturas mayores a 180° y en incendios deben ser protegidas de manera similar al acero. Los materiales poliméricos han demostrado tener comportamientos aceptables bajo condiciones de incendio, cuando se utilizan sistemas de protección y aditivos retardantes de fuego adecuados. La mayoría de las resinas poliméricas tiene una vida en almacén de entre 6 y 12 meses y deben ser conservadas entre 10° y 15°C. (Bank, 2006).

Los tipos principales de resinas utilizadas son (Bank, 2006):

- **Resina de polyester no saturada.** Estas resinas son utilizadas ampliamente para fabricar perfiles y varillas de polímeros reforzados con fibras pultrusionados para su uso en aplicaciones estructurales. Estas resinas también pueden ser utilizadas para el fortalecimiento con PRF pero las resinas epoxicas son preferidas para estas aplicaciones por sus propiedades adhesivas, baja contracción, y durabilidad ambiental.
- **Resinas epoxicas.** Estas resinas son utilizadas como matriz en una gran cantidad de productos de polímeros reforzados con fibras para aplicaciones ingenieriles estructurales. Cuando se aplica a hojas de fibras o textiles, las resinas epoxicas también se les puede referir como saturantes. Las resinas epoxicas también han sido utilizadas para manufacturar tendones de PRF para concreto presforzado y cables para puentes. Estas no se usan para producir grandes perfiles debido a su elevado costo y la dificultad de producción. Las resinas epoxica se endurecen con aminas y ácidos anhídridos.
 - En estas resinas, el agente endurecedor se provee por separado y se mezcla en proporciones específicas, justo antes de su uso, debido a la reacción de endurecimiento.
 - Las resinas epoxicas son particularmente versátiles y pueden ser formuladas con un rango de propiedades para servir de matriz a compuestos PRF o también servir como adhesivos. Los epoxicos utilizados como resinas para PRFs para ingeniería estructural pertenecen a las misma familia que los epoxicos utilizados actualmente para una gran variedad de aplicaciones constructivas, como puede ser anclas para concreto, unión de dos elementos prefabricados.
 - Las resinas epoxicas son conocidas por tener una excelente resistencia a la corrosión y sufrir contracciones menores que aquellas que sufren las resinas de polyester o vinylester. Su densidad es cerca de 1.05gr/cm³. Estas resinas pueden ser curadas a temperatura ambiente o a temperaturas altas.

- **Resinas de Vinylester.** Estas resinas tienen alta resistencia a la corrosión y son fáciles de procesar. En la actualidad son utilizadas para fabricar la mayoría de las varillas de PRF que se venden en el mundo y también son utilizadas para la creación de perfiles pultrusionados de PRF. Estas resinas son un híbrido de una resina epoxica y una resina de polyster no saturado.
- **Resinas Fenólicas.** Son las más antiguas y más utilizadas resinas termofijas; sin embargo, solo recientemente se han empezado a utilizar para producir PRFs para aplicaciones estructurales, debido a la dificultad de introducir una fase de refuerzo. Estas resinas se usan extensivamente en la producción de madera contrachapada y otros productos de madera ingenieril. Se están introduciendo a los PRFs estructurales porque tiene una resistencia superior al fuego, y se carbonizan y liberan agua cuando se quema.
- **Resinas de poliuretano.** Las resinas de poliuretano han sido introducidas recientemente al mercado como resinas estructurales. Estas han sido utilizadas extensivamente en su formulación termoplástica para producir espumas poliméricas estructurales y aislantes por décadas. Las resinas de poliuretano tienen una alta dureza y si se refuerzan con fibras de vidrio tienen alta resistencia a la tensión y al impacto. (Bank, 2006)

2.3 Biopolímeros

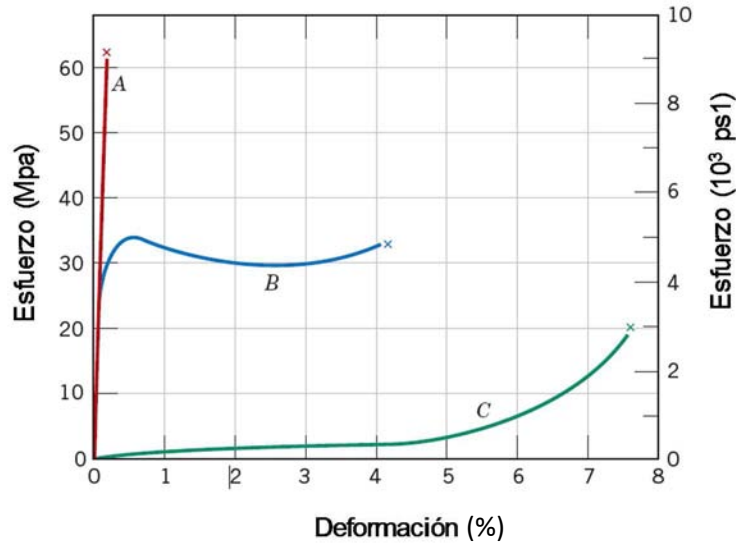
El efecto combinado del inminente agotamiento de recursos petroleros e incrementadas regulaciones ambientales, está generando interés en el desarrollo de materiales poliméricos independientes de los combustibles fósiles.

Los biopolímeros más comunes, y los que ofrecen el mayor potencial para competir con polímeros sintéticos en términos de costo y desempeño son las resinas de ácidos polilácticos (PLA) y aquellas basadas en sojas. El PLA son completamente biodegradables, pero su alto costo de producción a limitado su uso (Dittember & GangaRao, 2012).

Los polímeros biodegradables puede ser clasificados según su origen: naturales o sintéticos. Sin embargo una de las principales limitaciones de la aplicación de estos polímeros es el costo, que es entre dos y diez veces mayor que el de los polímeros sintéticos. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).

2.4 Comportamiento Esfuerzo-Deformación

En los materiales poliméricos se observan tres tipos diferentes de comportamiento esfuerzo deformación. Como se representa en la siguiente gráfica:



Gráfica 5. Comportamiento esfuerzo deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B) y con elevada elasticidad (curva C) (Callister, 2009).

Por regla general, el modo de fractura de los polímeros termofijos (redes con mucho entrecruzamiento) es frágil. Lo que correspondería a la curva A de la gráfica anterior. En términos simples, en el proceso de fractura, las grietas se forman en la región donde existe una concentración localizada de esfuerzos (por ejemplo, estrías, fisuras y muescas). Al igual que en los metales el esfuerzo se amplifica en la punta de una grieta, lo que conduce a la propagación de fisuras y a la rotura. Durante la fractura se rompen los enlaces covalente de las estructuras entrecruzadas y reticuladas (Callister, 2009).

2.5 Temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea

La fusión en un material polimérico corresponde a la transformación de un material sólido, que tiene una estructura ordenada de cadenas moleculares alineadas, en un líquido viscoso en el cual la estructura es altamente aleatoria. Este fenómeno ocurre por calentamiento a la temperatura de fusión T_m (Callister, 2009).

La temperatura de transición vítrea, T_g , ocurre en la región amorfa de un polímero a una temperatura debajo de la temperatura de fusión. En la T_g , las propiedades físicas (densidad) y mecánicas (amortiguamiento, dureza) de los polímeros sufren un cambio, cuando la temperatura se acerca a T_g desde abajo, el polímero cambia de rígido a viscoso.

La temperatura de fusión y transición vítrea son consideraciones importante cuando se plantean las aplicaciones en servicio de los polímeros (Bank, 2006).

CAPÍTULO 3 POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES

En los compuestos de matriz polimérica con fase de refuerzo de fibras naturales, la matriz mantiene las fibras juntas para proveer una forma y transferir la carga a las fibras por adhesión y/o fricción. La matriz también provee rigidez y forma a miembros estructurales, protege a las fibras de químicos y corrosión e influye en la ductilidad y desempeño ante los impactos. Entre más alta la resistencia a la tensión de la fibra y la mejor adhesión de fibra/matriz, será más corta la longitud mínima requerida para transmitir efectivamente los esfuerzos. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).

La falla de los hilos de fibra sobre la dirección de la carga, desunión, “pull-out” de la fibra y fractura frágil de la matriz son los mecanismos de falla dominantes en los compuestos de tela fibras naturales con matriz polimérica.

3.1 Adhesión matriz-refuerzo

Una de las desventajas que presentan los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales, es la incompatibilidad entre matriz y fase de refuerzo. La incompatibilidad entre fibras naturales y las matrices poliméricas conduce a una baja fuerza de la interfaz, cuando se compara con compuestos de fibra de vidrio o carbón. La mayor causa de esta desventaja es la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales, lo que resulta en una incompatibilidad con la matriz polimérica que es hidrofóbica. Esta incompatibilidad provoca una adhesión débil entre matriz y refuerzo, lo que causa que los compuestos reforzados con fibras naturales fallen bajo condiciones de humedad por delaminación o por hinchazón de las fibras (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013).

3.2 Disposición y arreglos del refuerzo

La arquitectura del refuerzo de estos compuestos será la responsable de proporcionar las propiedades mecánicas y posibilidades de geometrías del material.

La arquitectura del refuerzo se refiere al orden, forma y disposición de las fibras dentro de la matriz. Entre los más importantes encontramos:

1. Fibras cortas (2-20mm) en orden aleatorio en planos bidimensionales u orden aleatorio en tres dimensiones.
2. Fibras en forma de hilo en sentido longitudinal
3. Fibras en forma de tela en capas apiladas una sobre otra

Sobre el primer apartado solo hay que tomar en cuenta la longitud de la fibra y la fracción (ya sea por volumen o peso) deseadas. Por otro lado, cuando se trata de refuerzo según el segundo o tercer apartado, es necesario conocer las siguientes características de los materiales de refuerzo (Hollen, Langford, & Saddler, 1987):

- **Hilo** es el nombre genérico de un conjunto de fibras que se tuercen juntas, existen dos clases generales de hilos: hilos hilados hechos con fibras discontinuas y cortas e hilos elaborados con filamentos continuos, los hilados de filamentos son principalmente artificiales, ya que el único filamento natural es la seda.

- El número de un hilo hilado se expresa en términos de longitud por unidad de peso. Mientras más fino el hilo, mayor será el número. El número se basa en el número de hanks (1 hank equivale a 840 yardas) en una libra de hilo.
- El grado de torsión en el hilo varía según la longitud de la fibra, el tamaño del hilo y el uso a que se destina. Al incrementar la cantidad de torcido hasta el punto en que hay una perfecta cohesión de fibra a fibra, se incrementa la resistencia de los hilos. Cuando la torsión es excesiva, las fibras se colocan en ángulos rectos al eje del hilo y esto provoca una acción cortante entre las fibras, por lo que el hilo pierde resistencia
- Las **telas** pueden ser elaboradas a partir de soluciones, directamente de fibras, hilos y de la combinación de estos elementos junto con una tela o material hecho previamente, el proceso de fabricación de las telas determina la textura, su aspecto durante el uso, la conservación y el costo. Con frecuencia, el proceso determina el nombre de la tela; por ejemplo, fieltro encaje tejido, doble punto, jersey.
- Algunas de las telas elaboradas a partir de hilos son:
 - Entretejido (trencilla) Los hilos se entrelazan en forma diagonal y a lo largo, las telas son angostas, se utilizan principalmente para ornamentos, en forma circular se utilizan para agujetas de calzado, es elástica y fácil de amoldar a cualquier forma.
 - Tejido de punto. Uno o más hilos dan lugar a una serie de bucles o mallas que se entrelazan, es una técnica más rápida que el tejido en telar, requiere más cantidad de hilo para lograr el recubrimiento. Estas telas son elásticas, porosas y resistentes.
 - Tejido en telar. Dos o más conjuntos de hilos se entrelazan perpendicularmente, es las técnicas de construcción de mayor uso, y pueden destejarse de los extremos.
- Las telas más utilizadas son las tejidas en telar, sus características son:
 - Todos los hilos en las telas tejidas se entrelazan en ángulo recto, un ligamento es el punto en que el hilo cambia su posición de la superficie de la tela al lado interior y viceversa.

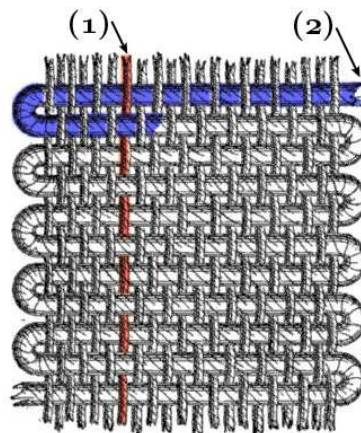


Ilustración 4. (1) Urdimbre (2) Trama. (Hollen, Langford, & Saddler, 1987)

- **Hilos.** Los hilos de la urdimbre y trama tienen diferentes características y la tela se comporta de forma distinta en las direcciones de urdimbre y trama. La urdimbre debe resistir las elevadas tensiones del telar, de manera que los hilos de urdimbre son más fuertes, de mejor calidad y tienen mayor torsión.
- **Cuenta.** La cuenta es el número de hilos de urdimbre y trama por pulgada cuadrada de tela cruda (la tela tal y como sale del telar). La cuenta de hilos se representa escribiendo primero el número de la urdimbre, por ejemplo 80x76; o bien se indica como el total de ambas 156. (La cuenta de hilos no debe confundirse con la cuenta o el número de hilo, que es una medida del grosor del hilo). La cuenta de hilos indica la calidad de la tela: mientras más alta sea la cuenta mejor será la calidad de la tela. Una cuenta más alta significa que hay menos encogimiento potencial.
- Una cuenta alta de hilos, proveerá a la tela de las siguientes propiedades: Firmeza, resistencia, estabilidad, resistente al viento, repelente al agua y retardante del fuego.
- Mientras que una tela con cuenta baja de hilos tendrá las siguientes propiedades: Flexibilidad, permeabilidad, facilidad de doblado y mayor potencial de encogimiento
- El **ligamento** se refiere a la forma en que se entrecruzan los hilos cuando se teje una tela. Los tres ligamentos básicos:
 - Tafetán. Es el más simple de los ligamentos fundamentales que se construyen en un telar simple. Se forma con hilos perpendiculares que pasan alternativamente por encima y debajo de cada uno de ellos. Cada hilo de urdimbre se entrelaza con un hilo de trama para formar el máximo número de ligamentos.

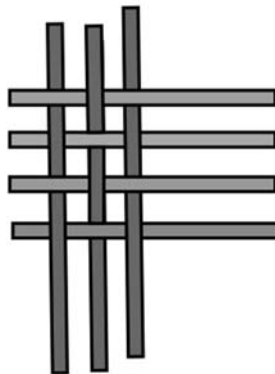


Ilustración 5. Ejemplo de cómo se cruzan los hilos en el ligamento tafetán (Hollen, Langford, & Saddler, 1987)

- Sarga. En este ligamento cada hilo de urdimbre o de trama hace una basta sobre dos o más hilos de urdimbre o de trama, con una progresión de entrecruzamiento de uno a la derecha o a la izquierda para formar una línea diagonal identificable llamada espiga. Una basta es la parte de un hilo que cruza sobre dos o más hilos de la dirección opuesta. Si una tela de tafetán y una tela de sarga tienen el mismo tipo y número de hilos, la tela de tafetán será más fuerte porque tiene más entrecruzamientos. Sin embargo, en la

sarga es posible juntar más los hilos en el mismo espacio y así la sarga será más fuerte.

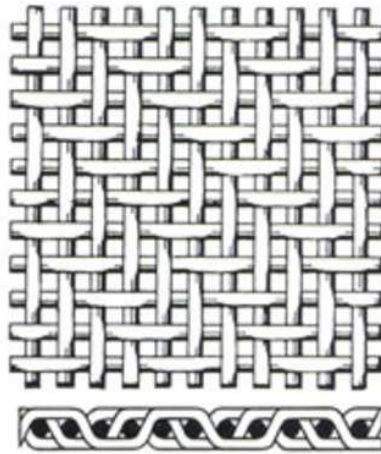


Ilustración 6. Ejemplo de tejido de sarga (Hollen, Langford, & Saddler, 1987)

- Tejido de satén. En el tejido de satén cada hilo de urdimbre hace una basta sobre cuatro hilos de trama y se entrelaza con el quinto hilo de trama con una progresión de entrecruzamiento de dos a la derecha o a la izquierda.

3.3 Efectos de la humedad sobre los polímeros reforzados con fibras naturales

En ambientes húmedos los polímeros reforzados con fibras absorben humedad, esto afecta sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas, además, con mayor absorción de humedad incrementa también la facilidad de ataques microbiales (biodegradación) (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013)

El componente de las fibras responsable por la absorción de humedad es la hemicelulosa.

En un polímero compuesto, la transportación de agua puede ser facilitada por tres mecanismos que son: difusión dentro de la matriz, imperfecciones de la matriz (micro espacios, poros o fisuras) o por capilaridad a lo largo de la interfaz fibra-matriz.

La manera en que un material compuesto absorberá agua dependerá de diversos factores, como son la temperatura, volumen de fibra, la orientación del refuerzo, la naturaleza permeable de la fibra, área de superficies expuestas, reacción entre el agua y la matriz.

El proceso de degradación por humedad de los polímeros reforzados con fibras naturales ocurre cuando la hinchazón de las fibras desarrolla esfuerzos en las regiones de la interface, provocando microfractura en la matriz alrededor de las fibras hinchadas, esto tiene como efecto una pobre transferencia de esfuerzos entre la matriz y el refuerzo.

En resumen se puede decir que los compuestos con refuerzo de fibras naturales son sensibles a la humedad y con el tiempo esto causa que dichos compuestos pierdan su funcionalidad.

Comparados con los compuestos reforzados con fibras de vidrio, aquellos cuyo refuerzo es de fibras naturales, sufren de muy baja resistencia a la humedad, los compuestos reforzados con fibras de naturales, son altamente sensibles a la influencia de agentes ambientales, por lo tanto es necesario mejorar la hidrofobia de las fibras por medio de tratamientos, para poder lograr compuestos con mejores propiedades mecánicas y desempeño ambiental. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).

3.4 Propiedades mecánicas

La mayoría de los compuestos reforzados con fibras naturales tienen una resistencia a la tensión máxima de entre 1000 y 2000 kg/cm². (Dittember & GangaRao, 2012)

Pero también se han reportado compuestos de epoxi/tela de lino pueden alcanzar resistencia a la tensión de hasta 380Mpa (3800 kg/cm²), acercándose a las propiedades de los compuestos de epoxi/fibra de vidrio. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).

3.5 Intemperización

Si los polímeros reforzados con fibras naturales son utilizados para exteriores, deben tener propiedades físicas y químicas que sean resistentes contra ataques de hongos, luz ultravioleta, humedad y estabilidad dimensional.

El proceso de degradación por intemperización que incluye: foto-radiación, degradación térmica, foto-oxidación e hidrólisis provocan cambios en las propiedades mecánicas, químicas y físicas del material.

Los compuestos de polímeros reforzados con fibras naturales expuestos a luz solar directa son sujetos a radiación que rompe los enlaces covalentes, causando pérdida de peso y color, obtención de un tono amarillo, aspereza en la superficie, deterioro de las propiedades mecánicas y fragilizado.

Las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibras naturales cambian bajo los efectos de la radiación ultravioleta, esto puede ser atribuido a la oxidación superficial, cambios en la cristalinidad de la matriz y degradación interracial. La fotodegradación de estos compuestos involucra varios factores, como el contenido de fibra, métodos de manufactura y condiciones ambientales.

Para aumentar la resistencia a la luz ultravioleta, estabilizadores UV pueden ser incorporados a un polímero durante su fabricación. La modificación de las fibras (Silano, alcalinización, clorado) y el uso de una capa de poliuretano ayudan a reducir los efectos de la intemperización.

Para proveer estabilidad a los colores, también pueden ser introducidos aditivos y modificaciones a las fibras durante el proceso de producción de los polímeros reforzados con fibras naturales. (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013).

3.6 Resistencia contra el fuego

Existe poca información de cómo se comportan los polímeros reforzados con fibras naturales ante el fuego, pero su baja resistencia es evidente, lo que crea una barrera técnica para la utilización de estos materiales en aplicaciones estructurales.

Entre los 100-200° C la matriz polimérica se reblandece, y entre 300°C y 500°C se comienza a descomponer liberando calor y sustancia tóxica. La descomposición de polímeros incluye la producción de gases combustibles, gases no combustibles, líquidos, sólidos (usualmente ceniza) y humo. Estos resultados pueden producir peligros como la evolución de los gases tóxicos, pérdida de integridad física, derretido y goteo, lo que proveerá otras superficies de ignición.

Los polímeros por sí solos, expuestos a altas temperaturas, tienen un comportamiento pobre y se vuelven bastante peligrosos, las fibras de vidrio o de carbón, son introducidas para mejorar esta deficiencia, pero las fibras naturales no tienen este efecto debido a que son más inflamables que las fibras sintéticas

Los compuestos basados en fenólicos, tiene baja flotabilidad, menos humo, ignición retardada y menor propagación de las flamas. El material carbonizado que se forma durante la exposición al fuego protege el centro del material, por lo tanto incrementa la integridad estructural. Por estas razones los fenólicos son considerados como una de las mejores matrices para polímeros reforzados con fibras naturales. Las fibras de lino tienen bajo contenido de lignina y son consideradas las que tienen la mejor resistencia contra el fuego entre las fibras naturales.

Para mejorar la resistencia al fuego de los polímeros con refuerzo de fibras naturales pueden ser utilizados: Barreras contra el fuego como, cerámicas, intumescentes, silicón, fenólicos y aditivos químicos pueden ser utilizados.

Los intumescentes (aditivos y recubrimientos) son las barreras contra el fuego que tiene las mejores posibilidades, debido a que cuando se calientan se vuelven espumas y se expanden, formando una superficie celular de material carbonizado, que protege al material que está debajo de la flama y el fuego. (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013)

3.7 Tratamiento y modificación de las fibras

Los tratamientos de las fibras, que se hace mediante agentes químicas que modifican la superficie y composición de las fibras, pueden ser para reducir la absorción de humedad, o también pueden ofrecer una mejor adhesión de las fibras y la matriz.

La mejor manera para reducir la absorción de humedad de las fibras naturales, parece ser el proceso de alcalinización (también conocido como mercerización), el tratamiento con álcalis se hace usualmente con KOH o NaOH. La alcalinización puede disolver la hemicelulosa, que es la parte más hidrofílica de la estructura de las fibras naturales, por lo tanto reduce la capacidad de las fibras para absorber humedad, además este proceso también ayuda a mejorar la adhesión entre las fibras y la matriz.

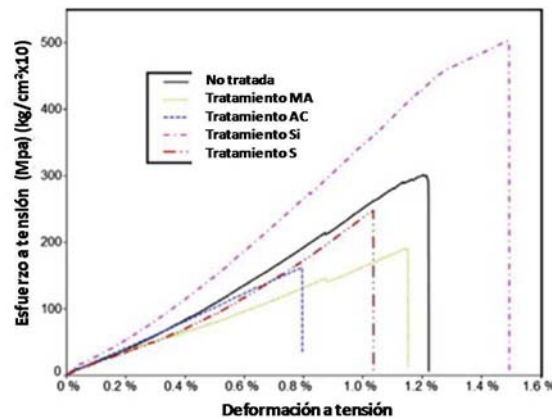
Uno de los procesos de alcalinización que ha arrojado los mejores resultados, es la exposición a una solución de NaOH con una concentración del 2-10% por 10-30 min, seguido por una neutralización con un ácido de baja concentración y lavado con agua destilada. Si las fibras no son cuidadosamente lavadas después de la alcalinización, los álcalis siguen afectando las fibras aun después de la exposición, lo que eventualmente lleva a un hinchamiento de las fibras y su degradación. (Dittember & GangaRao, 2012).

El tratamiento con álcalis, es benéfico para limpiar la superficie de la fibra, modificar la química en la superficie, reducir la absorción de humedad e incrementar la aspereza de la superficie. El tratamiento remueve las impurezas y sustancia grasosas de la fibra y crea una topografía más áspera que facilita el enclavamiento mecánico. También la superficie de la fibra purificada mejora la unión química entre la fibra y la matriz. El tratamiento con álcalis mejora la adhesión fibra/matriz incrementando las propiedades mecánicas de los compuestos.

Otros procesos que ha reportado buenos resultados (Azwa, Yosif, Manalo, & Karunasena, 2013) (Dittember & GangaRao, 2012) para reducir la absorción de humedad por las fibras naturales, es el tratamiento con silano, y el tratamiento de clorado de fibras.

Los tratamientos físicos, como el estiramiento y termo-tratado, no cambian la composición química de las fibras pero cambian la estructura de las fibras, propiedades de su superficie y por lo tanto influyen las propiedades de mecánicas de las fibras. (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014)

Para mejorar la unión de la matriz/fibra, se han considerado modificaciones químicas para las fibras de lino. En la gráfica siguiente se pueden apreciar las curvas de esfuerzo deformación para fibras tratadas con anhídrido mélico (MA), anhídrido acético (AC) silano (Si) y estireno (S).



Gráfica 6. Curvas de esfuerzo deformación para fibras de lino no tratadas y químicamente tratadas (Yan, Chouw, & Jayaraman, Flax fibre and its composites- A review, 2014).

3.8 Procesos de manufactura

Existen dos métodos principales para producir compuestos de polímeros reforzados con fibras (en este caso refiriéndose a compuestos con fibras de vidrio y carbono) para usos estructurales. Uno de ellos es un proceso industrializado desarrollado en la década de 1950 llamado pultrusión, mediante el cual los productos de PRF son producidos en fábrica y enviados al lugar de la obra para su instalación. El otro método, es un método manual, conocido como hand layup, en el que el producto de PRF es manufacturado en obra cuando va a ser instalado.

El método de pultrusión es utilizado para manufacturar varillas de refuerzo, perfiles, tiras para fortalecimiento de PRF y es el método más competitivo en cuanto a costos, cuando se trata de la fabricación de PRF de alta calidad para uso estructural. El método de hand layup también es económico y además es muy fácil de utilizar en el campo.

Pultrusión

La manufactura por pultrusión, es un proceso continuo y automatizado para producir partes de PRF a partir de materiales primas.

Para producir partes con fines estructurales, las fibras secas son impregnadas con una resina polimérica termofija de baja viscosidad y son guiadas en una molde de acero inoxidable, donde se endurecen para formar el PRF deseado. El material se va endureciendo mientras es jalado a través del molde por un aparato.

Hand layup

Este es el término dado al método manual de fabricación de PRFs, en el que se apilan capas de fibras impregnadas con resina polimérica líquida, que se endurecen para formar un compuesto de PRF sólido, el sólido toma la forma del molde o superficie donde fue aplicado. Este método es probablemente el método más antiguo de producir PRFs.

Este proceso es engañosamente simple, y producir un PRF de alta calidad utilizando el método requiere un grado de habilidad significativo además de un control de calidad adecuado.

El método es utilizado en varios grados de sofisticación, que todos sirven para mejorar la calidad de la pieza, definiéndose esta calidad como un alto volumen fraccional de fibras, colocación y alineación precisa de las fibras, y menos vacíos. (Bank, 2006)

Además de estos, existen una variedad de técnicas de manufactura para producir compuestos, como apilamiento de películas, infusión al vacío, moldeo manual, moldeo por compresión, devanado de filamento, devanado manual, moldeo por transferencia de resina (RTM), moldeo por inyección y pultrusión.

Cuando se selecciona una técnica de manufactura, se debería tomar en cuenta parámetros como: las propiedades deseadas, tamaño y forma de los compuestos, las propiedades de las materias primas y costos. El tamaño del compuesto se trata como un factor determinante para la fabricación del compuesto. Para la evaluación preliminar de los compuestos con tamaños pequeños, la inyección y moldeo por compresión son los preferidos como consecuencia de su simplicidad y periodos cortos de procesamientos. Para estructuras con mayor tamaño, moldeo abierto y procesos de autoclave (RTM y moldeo manual).

Los polímeros reforzados con fibras (PRF) naturales han sido adaptados exitosamente a casi todos los procesos de manufactura actualmente utilizados en la producción de compuestos sintéticos (Dittember & GangaRao, 2012).

3.9 Potenciales

3.9.1 Económicos

En el artículo “Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure (Reseña crítica de publicaciones recientes en el uso de compuestos naturales en infraestructura)” los autores (Dittember & GangaRao, 2012) afirman que la demanda por fibras naturales como aditivos para plásticos, en los Estados Unidos, está proyectada a incrementar un 30% anual en la industria automotriz y hasta un 60% anual para aplicaciones constructivas.

En cuanto a los costos de crear compuestos con fibras naturales, cada etapa de procesamiento necesaria para crear estas fibras aumenta el valor del producto final, por lo tanto los métodos de producción más simples poseen el mayor atractivo. Las modificaciones a la superficie de las fibras son necesarias, sin embargo estas aumentan el costo, por lo que deben ser optimizadas para que los compuestos con fibras naturales puedan competir con los de fibra de vidrio.

El verdadero reto se encuentra en encontrar nuevas aplicaciones para los polímeros reforzados con fibras naturales, lo cual lleva una reducción sustancial de los precios.

3.9.2 Ambientales

Los mismos autores (Dittember & GangaRao, 2012) también exponen una serie de potenciales ambientales de los compuestos reforzados con fibras naturales:

- Estos materiales muestran promesa en términos de sustentabilidad, debido a que sustituyen materiales petroquímicos por materias renovables.
- Menores emisiones de gases de efecto invernadero
- Oportunidades de crecimiento en las industrias de la agricultura y química
- La sustitución de elementos de cemento por elementos de PRFN proveería una huella de carbón mínima debido a la incorporación de recursos naturales capaces de absorber CO₂.
- Menor impacto ambiental al utilizar fibras naturales en sustitución a las fibras de vidrio. Las fibras naturales utilizan entre 20-25% de la energía necesaria para producir un kilogramo de material. Mientras que un polímero reforzado con fibras naturales consumen entre 40% y 60% menos energía que uno reforzado con fibras de vidrio.
- Sin embargo cuando se utilizan compuestos sintéticos el mayor detrimento ambiental proviene de la matriz, la cual es fabricada de materiales basados en el petróleo. Por lo que el desarrollo de materiales biopolímeros capaces de actuar como matriz, es de mayor interés ambiental que el desarrollo de refuerzos naturales.

Aunque en la actualidad no se puede afirmar si los polímeros reforzados con fibras naturales son más “verdes” que los materiales de construcción tradicionales (madera, acero, concreto) el análisis del ciclo de vida ha mostrado que los compuestos naturales se

comparan favorablemente con compuestos sintéticos, usando solo alrededor de 20% a 40% de energía para su producción. (Dittember & GangaRao, 2012).

Un gran obstáculo, que necesita ser sorteado para la comercialización de bio-compuestos es la durabilidad. La durabilidad se relaciona con la resistencia al deterioro resultado de causas tanto externas como internas. La falta de datos relacionados con la durabilidad de compuestos reforzados con fibras naturales es un reto que debe ser atendido antes de la popularización e implementación de los bio-compuestos en diferentes áreas de ingeniería. El ciclo de vida de los bio-compuestos debería ser desarrollado para cumplir ciertos requerimientos.

CAPÍTULO 4 APLICACIONES CONSTRUCTIVAS DE LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES

4.1 Refuerzo de elementos de concreto existentes con polímeros reforzados con fibras

Los sistemas de refuerzo con polímeros reforzados con fibras pueden ser usados para incrementar la resistencia y ductilidad de elementos de concreto reforzado existentes.

Parte del diseño del refuerzo, incluye la evaluación de la resistencia actual de una estructura existente. A menudo los planos originales no están disponibles y la estructura puede haberse deteriorado, esto puede presentar uno de los aspectos más desafiantes del diseño de un sistema de refuerzo.

Los sistemas de polímeros con fibras (de vidrio y carbón principalmente) para reforzar elementos de concreto estructuralmente deficientes y para reparar estructuras de concreto dañadas o deterioradas han estado en uso desde mediados de la década de 1980. La primera aplicación involucró vigas reforzadas para incrementar su resistencia a la flexión utilizando laminados de epoxi reforzados con fibras adheridos al soffito de las vigas. Este método es una modificación de aquel que había estado en uso desde mediados de la década de 1960 en el que se utilizaban placas de acero unidas con resina epoxica para reforzar vigas de concreto. Los sistemas de PRFs mostraron ventajas significativas sobre las placas de acero en constructibilidad y durabilidad, también se realizó trabajo para el refuerzo de columnas de concreto para mejorar sus resistencias axiales, contra el cortante y ductilidad, principalmente para cargas sísmicas, este método también fue una modificación de aquel en el que se utilizaban corazas de acero para el refuerzo de columnas. Esto fue seguido por trabajo en reforzar la resistencia al cortante de vigas (Bank, 2006).

Actualmente, los sistemas de refuerzo de concreto con PRFs caen en dos tipos (Bank, 2006):

- El primer tipo consiste en laminados de resinas termoestables reforzados con fibras de carbón o vidrio manufacturados en fábricas (típicamente, pultrusionados unidireccionalmente) que se adhieren a la superficie del concreto utilizando un adhesivo de epoxi. Los laminados manufacturados típicamente tiene un volumen fracción de fibras en el rango del 55 al 65% y son curados a altas temperaturas (típicamente $>300^{\circ}\text{F}$) pero adheridos en sitio a temperatura ambiente.
- El segundo tipo consiste en capas de hojas de fibras unidireccionales o telas de fibras secas (vidrio, carbono, aramida) que se saturan en el campo con un polímero termoestable (epoxi o vinil-éster) que a la vez une el laminado PRF al concreto. Estos sistemas típicamente tiene una fracción de volumen de fibras entre el 20 y el 50% y se curan a temperatura ambiente en el campo.

La interface entre el compuesto de PRF y el sustrato del concreto transfiere las cargas del concreto al compuesto de PRF:

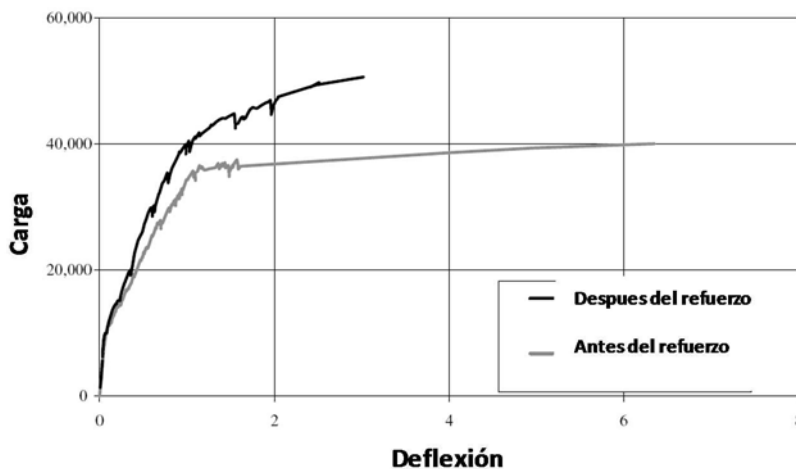
- En el caso del refuerzo a flexión, cortante o tensión axial, la transferencia de carga es primordialmente en cortante, estas aplicaciones son llamadas de unión-crítica.

- En el caso de refuerzo a compresión axial, donde el rol del sistema de refuerzo es confinar la expansión lateral del concreto fracturado, la interface de unión no es tan crítica mientras que el PRF este en contacto íntimo con el concreto y este enrollado alrededor del concreto continuamente para proveer presión de confinamiento requerida. Estas aplicaciones se llaman de contacto crítico.

Es importante notar, que en cualquier tipo de sistema la resina polimérica juega un papel crítico en el compuesto PRF al transferir la carga a las fibras y protegiendo dichas fibras.

Cuando se pretende reforzar un elemento de concreto sometida a esfuerzos de flexión, se adhiere un sistema de PRF a la cara de tensión para incrementar el refuerzo efectivo resultante en el elemento y por lo tanto aumentar el momento resistente.

En la gráfica 7 podemos observar una curva de esfuerzo deformación típica para una viga de concreto reforzada con un PRF, inicialmente, el elemento se comporta como una viga de concreto reforzado convencional, donde las varillas de refuerzo internas están cargando la mayoría de la fuerza de tensión. En un punto, generalmente visto como un cambio en la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación, el acero interno cede y no puede resistir ninguna carga de tensión adicional, esta carga de tensión adicional es cargada por el sistema de PRF y un incremento en la capacidad de carga del miembro es obtenido.



Gráfica 7. Respuesta carga-deformación de una viga de concreto fortalecida con PRFs. (Bank, 2006)

El refuerzo de miembros a flexión, es logrado únicamente, si existe capacidad compresiva adicional en el concreto para permitir el incremento en la capacidad de momento en la sección, por lo tanto el refuerzo a flexión es más conveniente para miembros de concreto que están de ligera a moderadamente reforzados, teniendo un rango de refuerzo de 20% a 40% de la relación de refuerzo del acero balanceado (Bank, 2006).

Cuando una viga es reforzada con PRFs para resistir mayores esfuerzos a flexión es necesario comprobar que será capaz de resistir los esfuerzos por cortante de estas nuevas cargas, en caso de ser necesario un refuerzo de PRF contra cortante también puede ser diseñado. Los sistemas de refuerzo con polímeros reforzados con fibras se aplican a las caras verticales de las vigas y funcionan de forma similar a la del acero interno de refuerzo,

como los estribos. Estos sistemas se adhieren a la superficie exterior del miembro de concreto en el plano transversal del elemento y resiste la fuerza cortante transversal resultante.

Los sistemas de refuerzo a cortante con PRFs pueden ser utilizados rodeando el elemento de concreto, parcialmente (3 lados) o completamente (4 lados), cuando el elemento no permite que se utilicen ninguno de los anteriores, también se puede unir el PRF solo a los lados verticales de las vigas (2 lados), pero estos son susceptibles a fallas por desunión en sus extremos y sus capacidades de resistencia están limitados por un coeficiente de reducción de adhesión. La siguiente figura ilustra cada uno de estos tipos de refuerzo:

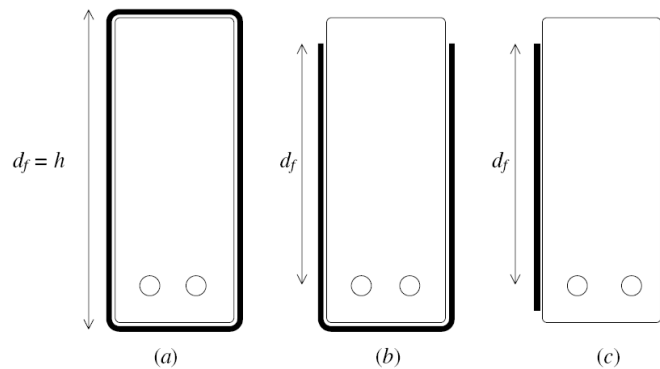


Ilustración 7. Reforzado a cortante con PRFs, modalidades y longitudes efectivas. (a) 4 lados, (b) 3 lados y (c) dos lados (Bank, 2006)

Las capas se pueden aplicar en ángulos inclinados α , también se debe calcular el ancho de la capa w_f , y se mide perpendicular a la dirección principal de la fibra, mientras que la separación entre capas, s_d , se mide a lo largo del eje de la viga. El ángulo para una posible fractura por cortante debe ser propuesto, se toma típicamente en 45° , y se denota como β . Estas variables geométricas se pueden apreciar en la siguiente figura:

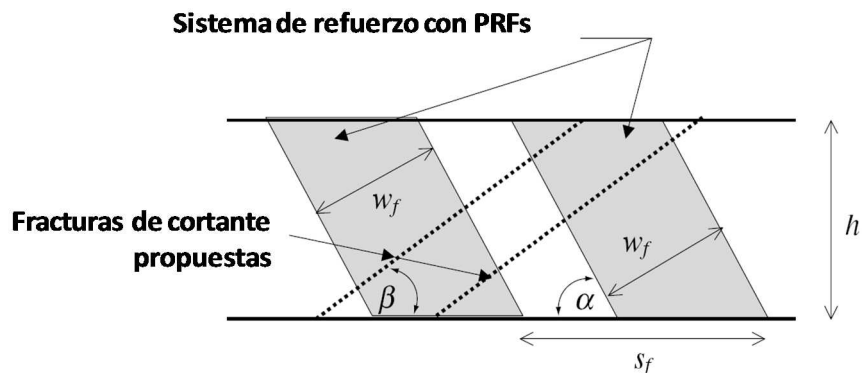


Ilustración 8. Variables geométricas para refuerzo a cortante (Bank, 2006)

Actualmente la extensión de la aplicación de polímeros reforzados con fibras de carbón/vidrio (V/CPRF) como sistemas de refuerzo para concreto ha sido limitada por el alto costo inicial, la insuficiencia de datos de desempeño a largo plazo, la falta de técnicas de manufactura y diseño estandarizadas, la durabilidad de las fibras de vidrio, el riesgo por los incendios y la preocupación que las características rígidas de los PRFs pudieran resultar en una falla repentina de la estructura sin ninguna señal previa. (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).

4.2 Polímeros con fibras naturales como material de refuerzo para el concreto

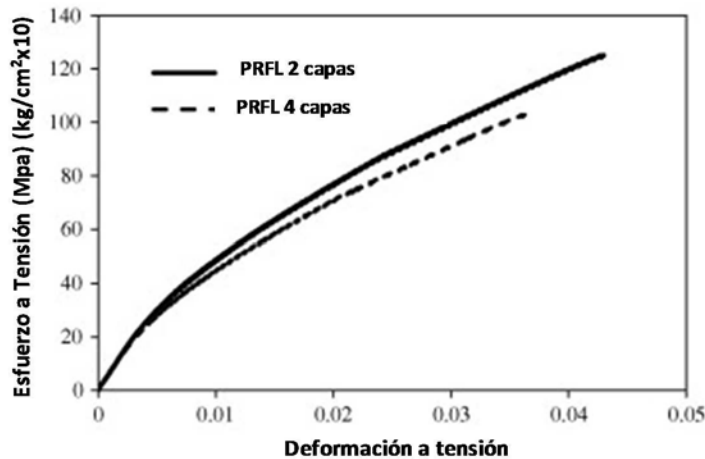
Libo Yan publicó una serie de artículos donde estudió las propiedades mecánicas de elementos de concreto reforzados por medio de corazas de polímeros con fibras naturales. Dichos artículos son:

- (Yan & Chouw, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete, 2013)
- (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013)
- (Yan, Chouw, & Jayaraman, Effect of column parameters on flax FRP confined coir fibre reinforced concrete)

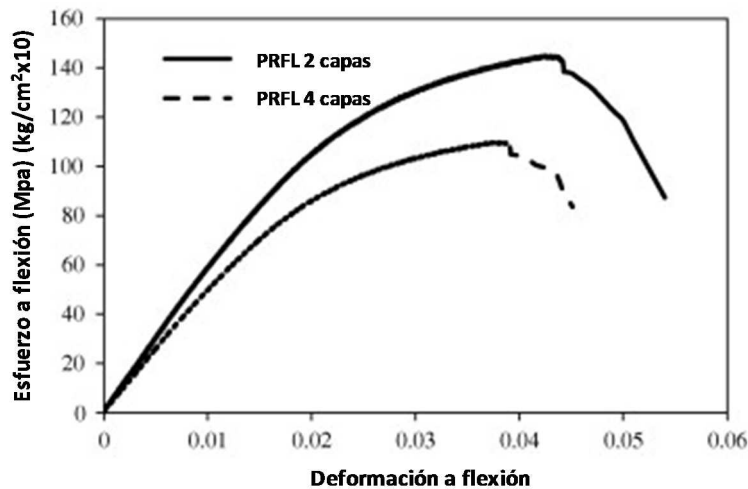
Para ésta serie de estudios fabricaron un polímero reforzado con fibras naturales, en este caso la matriz fue una resina epoxica y las fibras naturales utilizadas fueron de lino en forma de tela. En la siguiente tabla e ilustraciones podemos apreciar los valores de las propiedades mecánicas y sus curvas de comportamiento bajo diferentes tipos de esfuerzos.

No. de capas de lino	Espesor del ffrp (mm)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)	Módulo de Tensión (kg/cm ²)	Deformación a la tensión (%)	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Módulo de flexión (kg/cm ²)	Deformación a la flexión (%)	Volumen de fibras (%)
4	6.5	1340	95000	4.3	1440	80000	5.2	55.1

Tabla 5. Propiedades mecánicas del tubo de polímero reforzado con tela de lino (Yan & Chouw, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete, 2013)



Gráfica 8. Curva de tensión- deformación de los polímeros reforzados con lino (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).



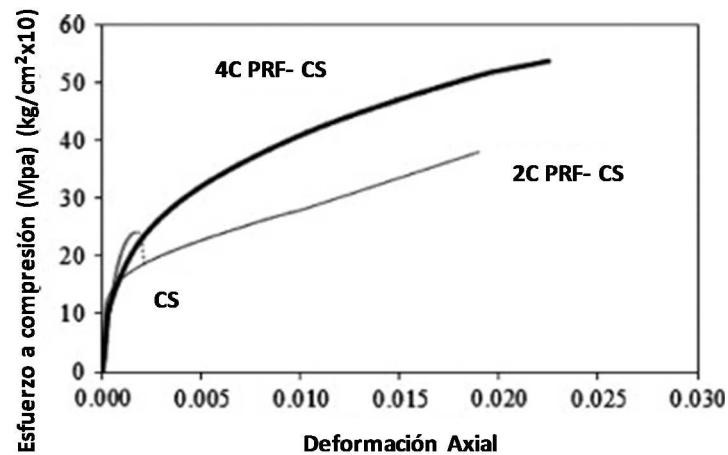
Gráfica 9. Curva de flexión- deformación de los FRP reforzados con lino (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013)

La coraza fabricada con este polímero, no corrosiva, reemplaza la función de las varillas de acero en el concreto convencional, principalmente en la capacidad de carga a la tensión, resistencia al cortante y también actúa como cimbra del núcleo de concreto.

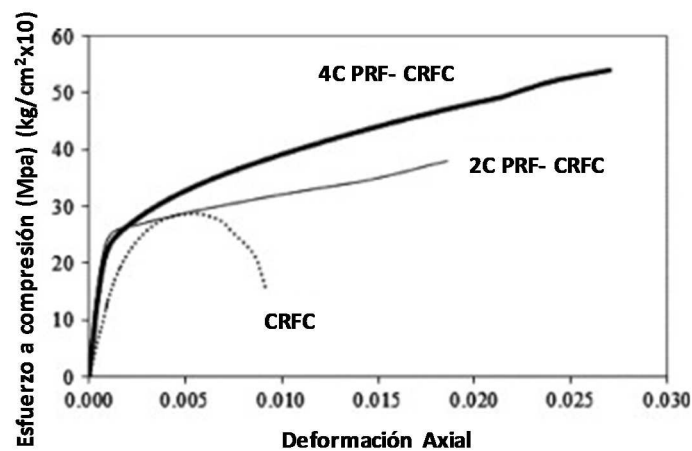
Además en el concreto se adicionaron fibras de coco para ayudar a reducir el espesor y número de grietas, y cambiaron el modo de fallo del compuesto a dúctil, como resultado del efecto de “crack bridging”. La inclusión de fibras de coco también incrementó el radio de amortiguación del compuesto de PRFL-CRFC (Concreto reforzado con fibra de coco) significativamente, así redujeron los efectos de las cargas dinámicas sobre la estructura.

En general, las fibras de coco aumentan la ductilidad y el polímero reforzado con fibra de lino contribuye a incrementar significativamente la capacidad de carga de la estructura compuesta.

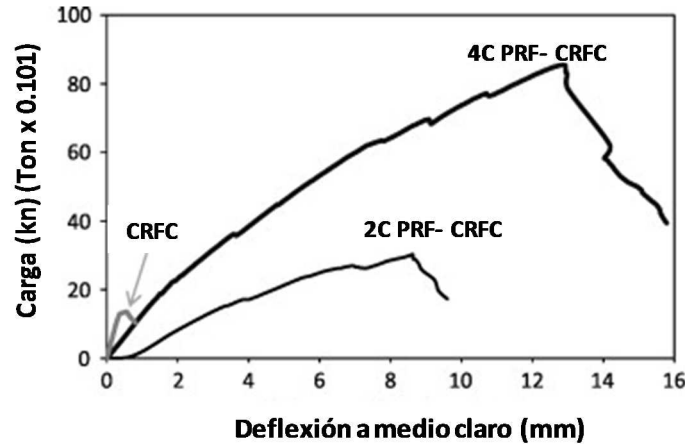
Las pruebas realizadas fueron de resistencia a compresión y flexión de cuatro puntos, para comprobar que las elementos de PRFL/CRFC eran viables para aplicaciones estructurales en elementos tanto verticales como horizontales. Los resultados se muestran en las siguientes gráficas:



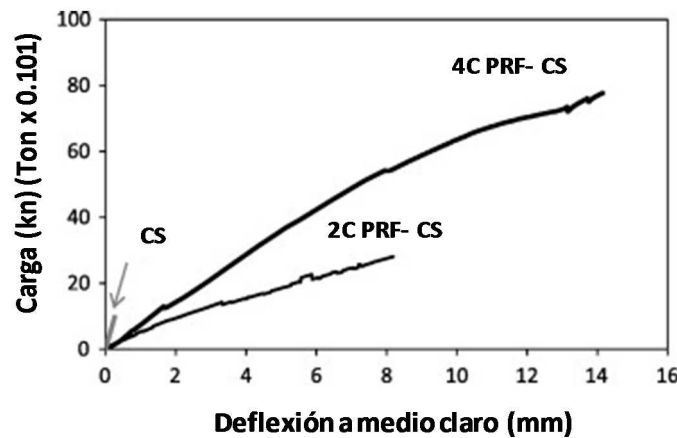
Gráfica 10. Curva de comportamiento del PRFL-CS bajo esfuerzos de compresión (Yan & Chow, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).



Gráfica 11. Curva de comportamiento del PRFL-CRFC bajo esfuerzos de compresión (Yan & Chow, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).



Gráfica 12. Curva de deflexión a medio claro del PRFL-CRFC (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013)



Gráfica 13. Curva de deflexión a medio claro del PRFL-CS (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).

Las gráficas 10 y 11 muestran los resultados de las pruebas a compresión, el eje de las yee es el esfuerzo a compresión, sus unidades son mega pascales ($1\text{Mpa}=10\text{kg/cm}^2$), el eje de las equis muestra la deformación axial, presentándose un esfuerzo máximo en la probeta confinada con el PRFL y concreto adicionado con fibras de coco de 518.8kg/cm^2 , mientras que en el concreto simple fue de 218kg/cm^2 . Las gráficas 10 y 11 muestran los resultados de las pruebas a flexión, el eje de las yee nos muestra la carga registrada por el aparato en kN que una unidad de este tipo es igual a 101.87kg , el eje de las equis representa la deflexión del elemento a medio claro, presentándose una carga máxima probeta confinada con el PRFL y concreto adicionado con fibras de coco de 8.62Ton , mientras que en el concreto simple soportó una carga de 0.75ton .

Dichas gráficas muestran las siguientes variables:

- CS. Concreto simple
- 2C PRF- PS. Concreto simple, envuelto por polímero con dos capas de refuerzo
- 4C PRF- PS. Concreto simple, envuelto por polímero con cuatro capas de refuerzo

- CRFC. Concreto adicionado con fibras de coco
- 2C PRF- CRFC. Concreto adicionado con fibras de coco, envuelto por polímero con dos capas de refuerzo.
- 4C PRF- CRFC. Concreto adicionado con fibras de coco, envuelto por polímero con cuatro capas de refuerzo.

Las probetas que se probaron a flexión tenían las siguientes características:

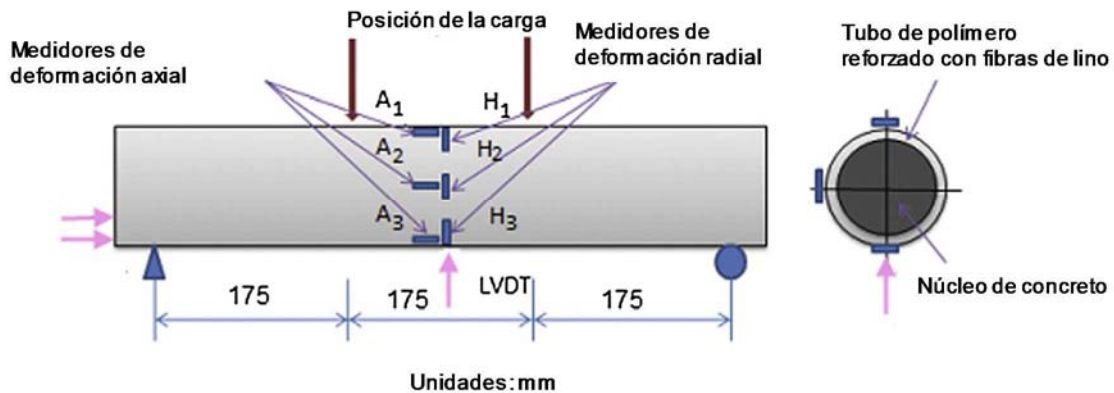


Ilustración 9. Probetas probadas a flexión (Yan & Chouw, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013)

Gracias a las fibras de coco la carga y deflexión máxima se incrementaron en un 36.5% y un 104% respectivamente, en contraste con el comportamiento frágil del concreto simple, el concreto reforzado con fibras de coco mostró un comportamiento dúctil post-falla, todo esto gracias al efecto de “crack bridging”

En flexión, el deslizamiento entre el tubo de PRFL y el núcleo de concreto es comúnmente observado en los especímenes de prueba, este puede comprometer el desempeño de la estructura.

Para prevenir este deslizamiento, algunos de los métodos que se han utilizados son:

- Utilizar cemento expansivo para crear el concreto
- Acostillado conector de cortante colocado en el interior
- Elemento con interior cuadrículado.

Los métodos mencionados anteriormente se consideran complicados y bastante tardados.

Otro método que se probó, fue introducir anillos del mismo material dentro del tubo de polímero reforzado con fibra de lino. Como lo muestra la siguiente ilustración.

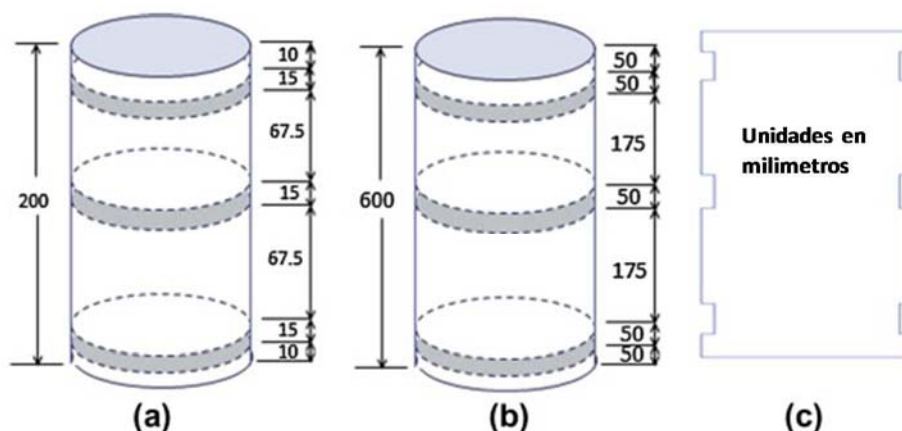


Ilustración 10. Vista esquemática de tubos FRP con anillos para evitar el deslizamiento (Yan & Chow, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete, 2013).

Utilizando dichos anillos se llevaron cabo pruebas de laboratorio que arrojaron los siguientes resultados:

Tipo de espécimen	Carga registrada por el aparato (ton)	Incremento por colado de concreto (%)	Incremento debido a la fibra de coco (%)	Incremento debido a los anillos (%)	Deflexión máxima (mm)	Incremento debido a los anillos (%)	Incremento debido a la fibra de coco (%)	Deslizamiento (mm)	Reducción de deslizamiento (%)
PRFL-H	3.27	-	-	-	22.4	-	-	-	-
PRFL-CS	7.47	128.3	-	-	21	-	-	1.6	-
PRFL-CS-Anillos	7.71	135.8	-	3.3	23.6	12.4	-	0.3	81.3
PRFL-CRFC	8.21	150.8	9.8	-	31.2	-	48.6	1.8	-
PRFL-CRFC-Anillos	8.33	154.5	7.9	1.5	36.4	16.7	54.2	0.4	77.8

Tabla 6. Resultado de pruebas de laboratorio (Yan & Chow, Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete, 2013)

Como podemos apreciar en la tabla anterior, el elemento sin anillos tuvo un deslizamiento de 1.8 mm, la inclusión de anillos en el tubo de PRLF evitó el deslizamiento entre este y el núcleo de concreto hasta en un 77%.

Algunas de las conclusiones presentadas en estos estudios fueron:

- Bajo compresión axial, el confinamiento con tubo PRFL mejora la resistencia a la compresión y ductilidad del concreto reforzado con fibras de coco significativamente. El incremento en resistencia y ductilidad incrementa con el espesor del tubo.

- En flexión, el confinamiento con el tubo de PRFL incrementa la carga lateral máxima y la deflexión a medio claro, remarcablemente.
- Los resultados muestran que el compuesto de PRFL-CRFC tiene la capacidad para utilizarse como elementos estructurales bajo cargas axiales y de flexión.
- Las ventajas de los PRFL (polímeros reforzados con fibras de lino) son sus altas relaciones fuerza-peso y rigidez-peso. Los compuestos de PRFL tienen una densidad aproximada de 1270kg/m³, que es alrededor de un sexto del acero.

4.2 Columnas y vigas celulares

(Burgueño, y otros, 2004) Demostraron en su artículo titulado “Load-bearing natural Fiber composite cellular beams and panels” la viabilidad para utilizar los compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales con propósitos estructurales al mejorar su eficiencia estructural mediante arreglos celulares del material.

La falta de rigidez de los polímeros reforzados con fibras naturales puede ser superada mediante configuraciones estructurales que colocan materia en lugares específicos para incrementar el desempeño estructural y por lo tanto menor peso. La naturaleza provee muchos ejemplos de estructuras eficientes y entre las más comunes se encuentran paneles sándwich celulares, que consisten de una piel densa conectada integralmente a un núcleo celular de baja densidad. Los materiales celulares tienen formas generales, ya sea arreglos celulares bidimensionales (paneles de abeja) o tridimensionales (espumas) con propiedades únicas que dependen de la fracción volumétrica del sólido, y de la geometría y arreglo de las células.

En este estudio, se diseñaron vigas y paneles con adecuaciones geométricas celulares, las cuales aparecen en la siguiente ilustración:

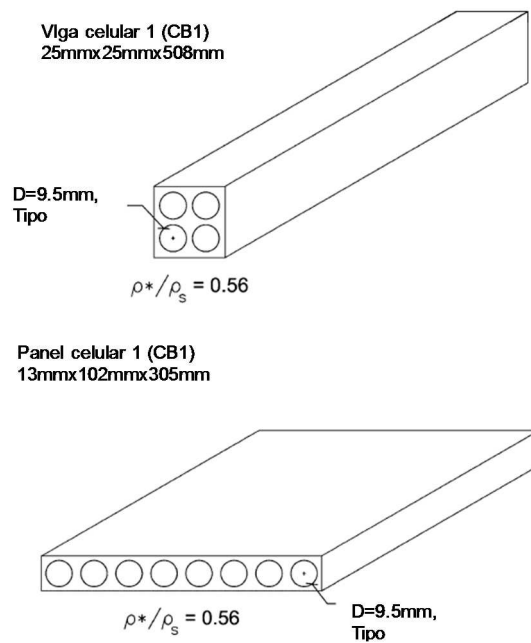


Ilustración 11. Geometría de los paneles y vigas celulares (Burgueño, y otros, 2004)

Las dimensiones de los componentes fueron escogidas para obtener una respuesta dominada por la flexión. Una arquitectura celular periódica (fila de células prismáticas) fue escogida como la base de la configuración para evaluar el efecto del diseño estructural celular.

La matriz polimérica utilizada en éste estudio, fue poliéster no saturado, mientras que el refuerzo se logró con fibras naturales de cáñamo verde, cáñamo crudo, lino y fibras de vidrio-E. Se probaron varios volúmenes y longitudes de fibra en compuestos, los cuales se describen en la siguiente tabla:

Tipo de fibra	Fracción		Longitud (mm)
	Volumétrica (%)	Peso (%)	
Cáñamo verde	14	13	2-10
Cáñamo verde	19	17	2-10
Cáñamo verde	27	25	2-10
Cáñamo verde	28	25	5-20
Cáñamo crudo	21	20	8-12
Lino	37	33	1-2
Fibra de vidrio-E	28	29	6-8

Tabla 7. Detalles del refuerzo de las probetas (Burgueño, y otros, 2004)

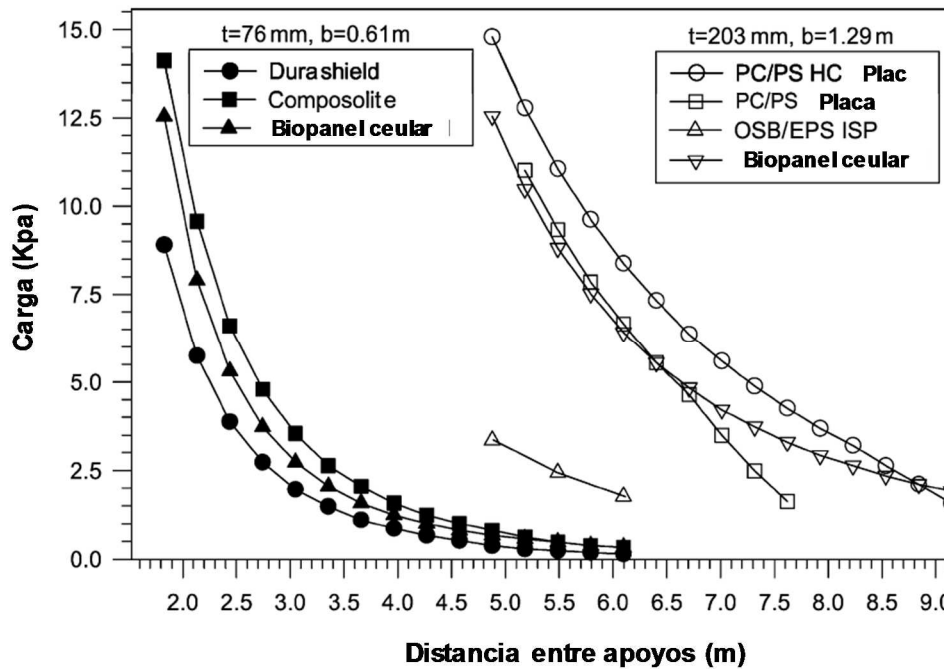
Las propiedades mecánicas evaluadas en este estudio fueron: módulo de elasticidad, resistencia máxima a tensión, resistencia al impacto, coeficiente de expansión térmica y absorción de humedad. Y los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Material	Módulo Elástico (Gpa)	Resistencia máxima a la tensión (Mpa)	Resistencia al impacto (J/m)	Coeficiente de expansión térmica ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)	Absorción de humedad (%)
Cáñamo verde 13%	3.81	14.47	6.86	59.00	0.96
Cáñamo verde 17%	4.40	14.91	7.54	45.00	1.05
Cáñamo verde 25%	5.23	16.79	10.40	34.10	1.31
Cáñamo verde 25%	8.65	10.08	17.45	35.20	1.44
Cáñamo crudo	6.15	19.49	13.52	23.20	1.37
Lino	3.37	13.31	5.28	67.60	1.71
Fibra de vidrio-E	7.80	34.70	67.29	30.70	0.34

Tabla 8. Resultados de las pruebas mecánicas ejecutadas (Burgueño, y otros, 2004)

En cuanto al módulo de elasticidad, se puede observar que los resultados de las probetas de fibra de vidrio fueron 1.5 mayores, sin embargo las probetas con de cáñamo verde con fibras largas obtuvieron un mayor resultado. En cuanto a la resistencia a la tensión, los resultados de las probetas de fibra de vidrio fueron 2.3 veces mayores que las de los biocompuestos. En la prueba de impacto, los resultados de las probetas de fibra de vidrio fueron 5.6 veces mayores que aquellos obtenidos de las probetas de fibras naturales.

Los resultados de la experimentación en los paneles celulares se extrapolaron para evaluar el desempeño a corto plazo de componentes estructurales de escala 1:1 y compararlos con sistemas de losas convencionales. Esto se representa en la siguiente gráfica:



Gráfica 14. Comparación de desempeño de los bio-paneles (Burgueño, y otros, 2004)

El primer juego de curvas es para un panel con medidas de $76\text{ mm} \times 0.61\text{ m}$, para este grupo el bio-panel se compara con sistemas de paneles sándwich de fibra de vidrio/vinylester que se encuentran disponibles comercialmente. El segundo juego de curvas es para un panel de $203\text{ mm} \times 1.29\text{ m}$. Para este grupo se compara el bio-panel con una placa prefabricada pretensada de concreto de núcleo hueco (PC/PS HC), una placa de concreto prefabricada pretensada (PC/PS) y un panel de madera.

Los resultados que se muestran en esta gráfica indican que los paneles de polímero reforzado con fibras naturales desarrollados en esta investigación pueden competir con otros paneles que se encuentran disponibles comercialmente, cuando se evalúa su desempeño a corto plazo.

CAPÍTULO 5 EXPERIMENTACIÓN

5.1 Diseño del experimento

Para continuar la investigación fue necesario llevar a cabo una serie de procesos. De los cuales el primero era fabricar el material compuesto de matriz polimérica y refuerzo con fibras naturales.

Cuando hablamos de materiales compuestos nos referimos aquellos elementos que se forman por la unión de dos materias primas para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos están conformados por dos fases principales:

- Fase aglutinante o matriz. Esta tendrá la función de dar forma, continuidad, cohesión al material, además de transmitir los esfuerzos y proteger a la fase de refuerzo de agentes físicos y químicos.
- Fase de refuerzo. Será la encargada de resistir, distribuir y disipar los esfuerzos que se aplique sobre un material compuesto.

Dentro de este capítulo se describen las materias primas y procesos utilizados para fabricar el material compuesto deseado.

Dicho material se fabrica con el objetivo de poder ser aplicado con fines estructurales dentro del ámbito de la construcción. El interés en los materiales compuestos con refuerzo de fibra de natural ha visto en aumento a nivel mundial debido a su potencial ambiental y aplicaciones. Este material tendría la ventaja de estar fabricado en parte de materias primas biodegradables (las fibras naturales), su ligereza y resistencia a los esfuerzos.

El siguiente paso era someter dicho producto a diversas pruebas de laboratorio para obtener las propiedades de resistencia y comportamiento del material ante distintos tipos de esfuerzos. Con el fin de seguir los parámetros establecidos para corroborar la veracidad de los datos obtenidos fue necesario consultar las normas ASTM aplicables al material que se estudia. Las pruebas realizadas fueron de resistencia a tensión y a flexión.

Los resultados de dichas pruebas y las conclusiones obtenidas a partir de estas también se presentan en este capítulo.

5.2 Materiales y procesos utilizados en la fabricación de las probetas

5.2.1 Matriz polimérica

El objetivo de utilizar fibras naturales para obtener un material estructural fue el que marcó la pauta para escoger la matriz polimérica. Las fibras naturales no pueden ser trabajadas a más de 180°C lo que deja limitada las opciones de las matrices que pueden ser reforzadas con dichas fibras. Las opciones se reducen al concreto y algunos polímeros. El concreto se desechó porque los efectos causados por el refuerzo de las fibras son mínimos además de que al ambiente alcalino provocado por el cemento degrada las fibras rápidamente. El polímero que se escogió fue la resina epoxica, debido a que se trabaja a temperatura

ambiente, resistencia mecánica, resistencia contra la corrección y baja expansión térmica. Dependiendo del tipo de resina epoxica que se utilice estas propiedades variaran.

En esta investigación se utilizó la resina epoxica del fabricante Axson Technologies, modelo **Epolam 2015**, con endurecedor **Epolam 2015**.



Ilustración 12. Resina epoxica Epolam 2105, endurecedor Epolam 2015 y desmoldante 841, todos marca Axson

Debido a que según el modelo y proveedor de resina sus propiedades cambien, a continuación se presentes las propiedades mecánicas reportadas por el proveedor:

Temperatura de transición vítrea	°C	88
Esfuerzo a flexión máximo	Mpa	120
Resistencia a tensión	Mpa	70
Deformación máxima	%	6
Resistencia al impacto Charpy	kJ/m2	55
Dureza	Shore D15	82

Tabla 9. Propiedades mecánicas de la resina epoxica utilizada

La dosificación indicada por el proveedor será:

- 32 gramos de catalizador por cada 100 gramos de resina

5.2.2 Fibras naturales utilizadas como fase de refuerzo del material

Como ya se dijo antes, el objetivo central de esta investigación, es el uso de las fibras naturales para crear materiales con aplicaciones arquitectónicas o estructurales, que presentarían la ventaja de ser ligeros, requieren poca energía en su procesamiento y presentan potencial estructural. Las fibras escogidas para usarse como fase de refuerzo de nuestro material son fibras de henequén, dichas fibras se escogieron porque son producidas en el país y presentan altos valores de resistencia a la tensión (valores reportados en literatura de hasta 5700kg/cm²) y fueron provistas por Acormex¹, Dichas fibras se utilizaron en dos modalidades: hilos de fibras continuas en un solo sentido, y fibras en forma de tela, en sentido vertical y horizontal.

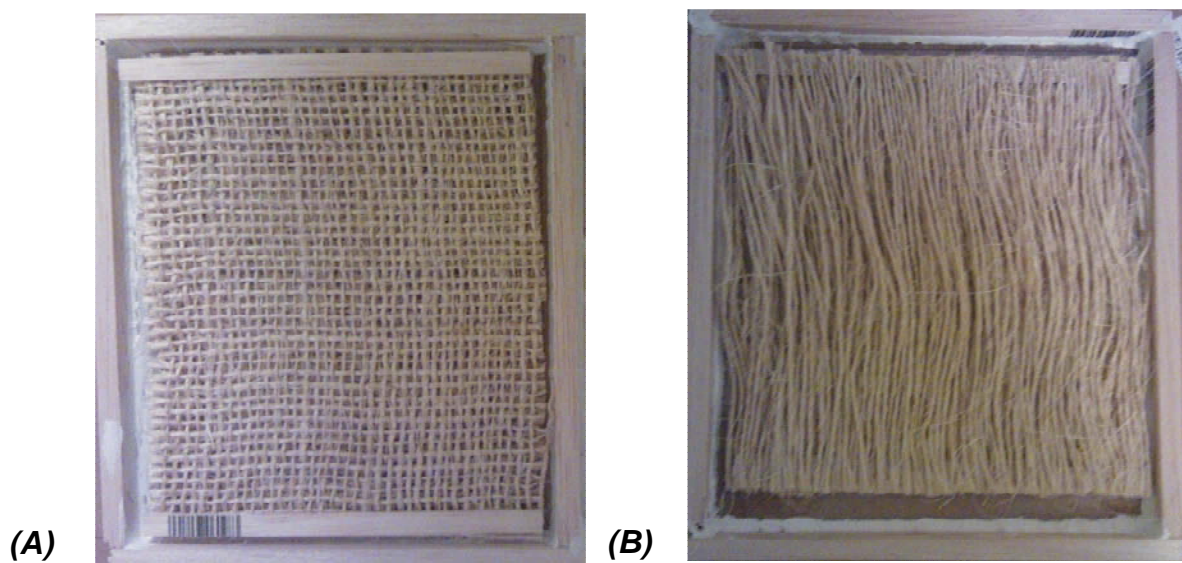


Ilustración 13. fibras de henequén en (a) tela (b) fibras en un solo sentido

El proveedor proporciono las fibras en forma de tela como se aprecia en el inciso (A) de la ilustración anterior. Esta tela está constituida por hilos de 1.75mm de diámetro en promedio, tanto en el sentido horizontal, como en el vertical, con un espacio aproximado entre ellas de entre 4 y 5mm. Cada fibra de henequén tiene un diámetro aproximado de 0.06mm por lo que cada hilo contiene alrededor de 30 fibras. Las fibras que se utilizaron en un solo sentido fueron obtenidas a partir de esta tela.

5.2.3 Tratamiento y modificación de las fibras

Antes de crear las probetas, algunas de las fibras se sometieron a un tratamiento químico que se describe a continuación:

¹ <http://www.acormex.com/tela-henequen.html>

1. En primer lugar se creó una solución de agua e NaOH (Hidróxido de sodio o como se le conoce comercialmente, sosa caustica). La solución constaba de 3 litros de agua y 5% (150 gramos) de hidróxido de sodio. EL NaOH se agrega al agua para aumentar el nivel de alcalinidad del agua.
2. Las fibras se introdujeron en la solución por 20 minutos.
3. Una vez pasados los 20 minutos se retiraron de la solución y se enjugaron en otra solución de 3 litros de agua y 50ml de ácido muriático, con el objetivo de estabilizar la alcalinidad producida por el hidróxido de sodio.
4. Las fibras se enjugaron una segunda vez en agua de la llave.
5. Para evitar que las fibras tuvieran cualquier rastro de humedad a la hora de introducirlas en la matriz polimérica, se introdujeron un horno a 80°C durante dos horas.

Según la bibliografía este tratamiento tendrá el efecto degradar la lignina de las fibras que es el componente que absorbe más humedad. Además hará más áspera la superficie de las fibras, lo que causara una mejor adhesión entre dichas fibras y la matriz polimérica. Para comprobar y cuantificar estos efectos y cualquier otro provocado por este tratamiento químico se comparan los resultados de la prueba a tensión de un lote de probetas fabricadas con fibras tratadas químicamente contra los resultados de un lote de probetas fabricadas con fibras sin tratamiento químico.

5.2.4 Proceso de fabricación de las probetas

Para fabricar las probetas se utilizó el proceso de hand layup, que consiste en apilar manualmente capas de tela saturada con resina para formar una lámina, esto por la facilidad y que no es necesario ningún tipo de equipo de manufactura especializado. La fabricación se realizó como se describe a continuación:

- Se crea un molde que tenga las dimensiones deseadas. Es importante que el molde sea sellado en sus extremos para evitar la fuga de resina.
- En el fondo del molde se colocó un papel encerado, al que además se le aplico un desmoldante (también proveído por Axson Technologies).
- Las fibras ya sea en forma de tela o hilos en una sola dirección, las fibras fueron dispuestas en capas. La descripción de la probeta especifica el número de capas utilizadas.
- Las capas de fibras se saturan de resina y se van colocando de una en una, sobre el molde, hasta alcanzar el número de capas deseadas.
- Se utilizó un rodillo para compactar las capas y evitar que se formen burbujas en la resina.

Una vez terminado el proceso anterior, las probetas se dejan fraguar 24 horas a temperatura ambiente y luego se les da un tratamiento térmico a 80°C durante 16 horas. Este proceso de fraguado y tratamiento térmico es el descrito por el fabricante para alcanzar las propiedades mecánicas que especifica la ficha técnica de la resina epoxica. El tratamiento térmico en específico sirve para acelerar el proceso de fraguado y alcanzar los valores máximos de resistencia mecánica de la resina epoxica.

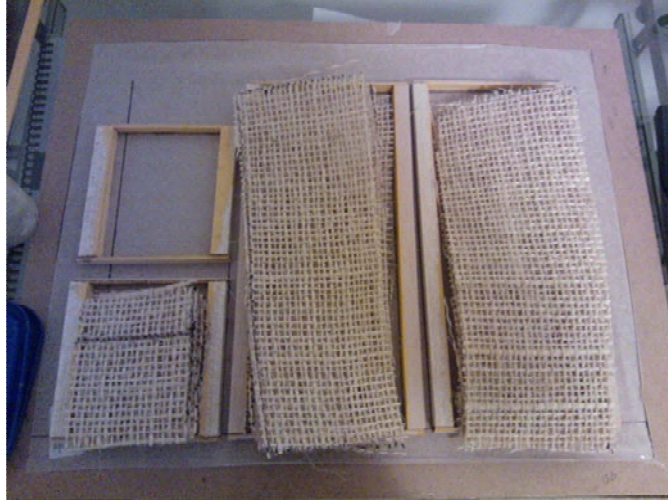


Ilustración 14. Ejemplo de molde y capas de fibras listas para recibir la resina epoxica

5.3 Laboratorio y equipo utilizado

Todas las pruebas mecánicas se realizaron en el laboratorio de ensaye de materiales de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Culhuacán del Instituto Politécnico Nacional.

La maquinaria utilizada para realizar, tanto las pruebas de flexión, como las de tensión, fue una Maquina Universal de Shimadzu AGS-50kNXD de 50kN de capacidad. Para las pruebas de flexión se utilizó una base marca Instron. Esta máquina se calibra automáticamente antes de cada prueba.



Ilustración 15. Maquina universal

Las dimensiones de las probetas y las fibras fueron tomadas un vernier digital marca Park Tool, con capacidad de medición de hasta centésimas de milímetro.

Todas las pruebas fueron realizadas bajo la supervisión y asesoría del Ing. Juan Francisco Fortis Roa, profesor de tiempo completo en la licenciatura de Ingeniería Mecánica en la ESIME Culhuacán.



Ilustración 16. Vernier digital Park Tool

5.4 Normas Implementadas

5.4.1 Norma ASTM D-3039 2002 Método estándar para la obtención las propiedades a tensión de materiales compuestos de matriz polimérica.

(American Society for Testing and Materials, 2004)

De acuerdo con la norma, la definición de la geometría del espécimen de prueba se divide en dos etapas, a continuación se describe cada una de ellas:

- A) Requerimientos generales (forma obligatoria y tolerancias):

Parámetro	Requerimiento
Requerimientos del cupón:	
Forma	Sección transversal rectangular continua
Alto mínimo	Agarre+2 veces largo+longitud de calibrador
Largo	Como sea necesario
Tolerancia del largo del espécimen	+/-1% del largo
Espesor del espécimen	Como sea necesario
Tolerancia de espesor del espécimen	+/-4% del espesor
Planitud	Aplanado con presión mínima presión manual

Tabla 10. Requerimientos geométricos de un espécimen de tensión

- C) Ejemplos detallados (Prácticas típicas no obligatorias):

Orientación de la fibra	Largo (mm)	Alto total (mm)	Espesor	Alto de la pestaña	Espesor de la pestaña
0° Unidireccional	15	250	10	56	1.5
90° Unidireccional	25	175	20	25	1.5
Balanceada y simétrica	25	250	25		
Discontinua-al azar	25	250	25		

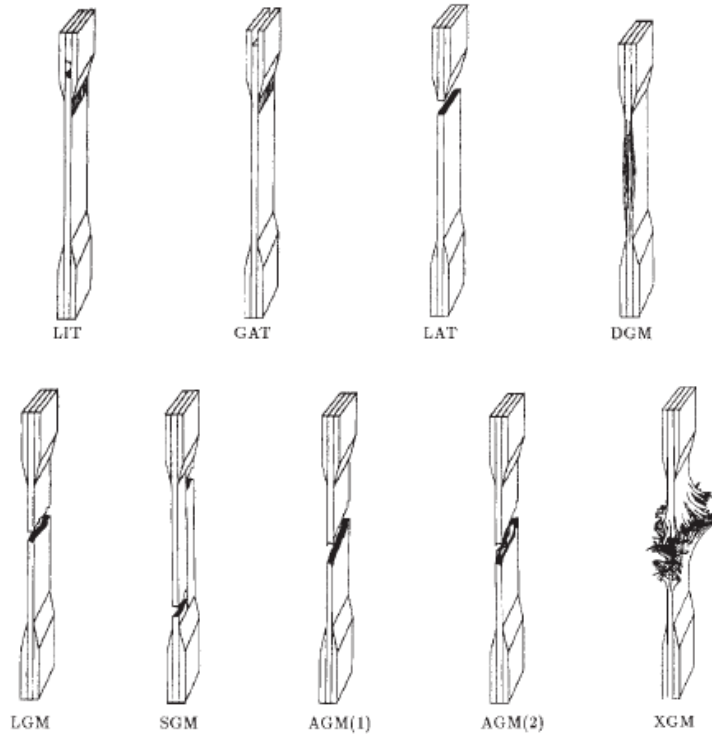
Tabla 11. Recomendaciones de geometría del espécimen para tensión

Durante la fabricación de las probetas, el control de la alineación de las fibras es crítica. Una alineación inapropiada de las fibras reducirá las propiedades medidas. El alineamiento errático también incrementará el coeficiente de variación. El método de preparación de las probetas deberá ser reportado.

Procedimiento.

- La geometría de las probetas deberá cumplir con los parámetros antes mencionados, sus dimensiones deben ser medidas cuidadosamente y reportadas.
- La velocidad de aplicación de carga será seleccionada para producir una falla en un tiempo entre 1 y 10 minutos.
- Se deberán probar al menos tres especímenes para que los resultados tengan validez estadística.

El tipo modo y ubicación de la falla deberán ser registrados. Esto se hace con respecto a la siguiente nomenclatura:



Primer carácter		Segundo Carácter		Segundo Carácter	
Tipo de falla	Código	Área de falla	Código	Ubicación de la falla	Código
Angular	A	Dentro del agarre	I	Fondo	B
Delaminación del borde	D	En el agarre	A	Superior	T
Agarre/pestaña	G	<1W del agarre	W	Izquierdo	L
Lateral	L	Calibrador	G	Derecho	R
Multimodal	M (xyz)	Áreas múltiples	M	Medio	M
División larga	S	Varios	V	Varios	V
Explosión	X	Desconocido	U	Desconocido	U
Otro	O				

Tabla 12. Códigos/tipos de falla de prueba de tensión

Cálculo

La resistencia última a la tensión será calculada según la ecuación (reportar los resultados a tres décimas):

$$F^{tu} = p^{max} / A$$

Donde:

- F^{tu} = Resistencia ultima a la tensión (kg/cm²)
- P^{max} =Carga máxima antes de la falla (kg)
- A = Área promedio antes de la deformación (cm²)

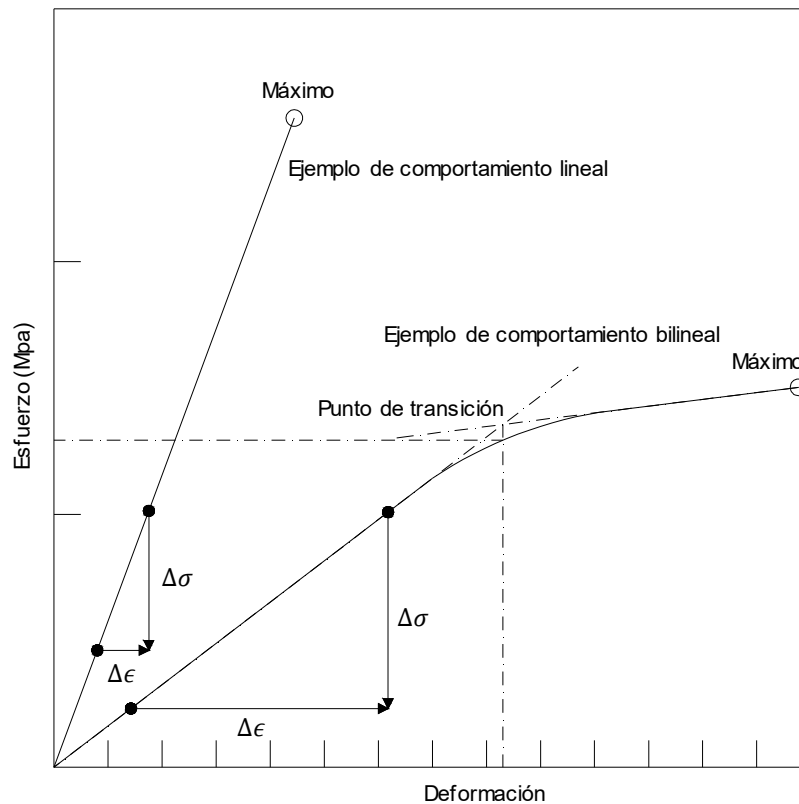
El módulo elástico se determinara con la siguiente formula

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

Donde:

- E = Módulo elástico a tensión (kg/cm²)
- $\Delta\sigma$ = Diferencia en el esfuerzo aplicado entre dos puntos de deformación (kg/cm²)
- $\Delta\epsilon$ = Diferencia entre dos puntos de deformación (cm/cm)
- ϵ = Deformación unitaria (cm/cm)

Como ejemplo, tenemos la siguiente ilustración:



Gráfica 15. Curvas esfuerzo-deformación típicas

5.4.2 Norma ASTM D-790 2002 Método estándar para la obtención las propiedades a flexión de plásticos con y sin refuerzo y material de aislamiento eléctrico.

(American Society for Testing and Materials, 2004)

Alcances de la norma. Esta norma cubre los métodos de pruebas para determinar las propiedades a flexión de plásticos reforzados y sin refuerzo, incluyendo compuestos de alto módulo y materiales de aislamiento eléctrico, en la forma de barras rectangulares moldeadas directamente o cortadas de hojas. Estos métodos son aplicables para materiales rígidos y semirrígidos. Sin embargo esta prueba no será aplicable para aquellos materiales que no rompen o fallan en la superficie exterior de la probeta antes de alcanzar un 5.00% de deformación.

Este método utiliza un sistema de carga de tres puntos aplicado a una viga simplemente apoyada.

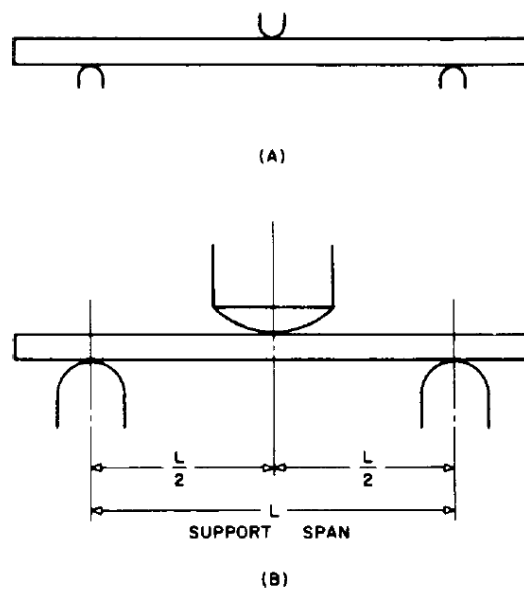


Ilustración 17. Rangos aceptables de radios de soportes y nariz de carga. (A) Radio mínimo 3.2 mm (b) Radio máximo 1.6 veces el espesor de la probeta; radio máximo nariz de carga= 4 veces el espesor de la probeta

La relación espesor-distancia entre soportes, deberá ser escogida de tal manera que la falla ocurra en las fibras exteriores de la probeta y se deba al momento flexionante. Se recomiendan relaciones 1:16 o menores.

Cálculos

La resistencia a flexión puede ser calculada, para cualquier punto de la curva carga-deflexión con la siguiente expresión:

$$\sigma_f = 3PL/2db^2$$

Donde:

- σ_f = Esfuerzo en las fibras exteriores a medio punto (kg/cm²)
- P =Carga aplicada en un punto de la curva esfuerzo-deflexión (kg)
- L =Distancia entre apoyos (cm)
- b =Espesor de la probeta (cm)
- d = Ancho de la probeta (cm)

5.5 Pruebas de resistencia a la flexión

Las pruebas a flexión al material se realizaron bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM D-790. Utilizando el método de tres apoyos, todos del mismo radio, que fue igual a 1.26cm. En la siguiente ilustración se puede observar un ejemplo del procedimiento:



Ilustración 18 ensayo a flexión de probetas de resina epoxica con refuerzo de fibras de henequén

Para estas pruebas se ensayaron 6 probetas, de las cuales sus características se describen en la siguiente tabla:

Descripción de las probetas ensayadas a flexión								
	Clave probeta	Composición (En volumen)		Fibra			Espesor (cm)	Ancho (cm)
		Fibra (%)	Resina (%)	Modalidad	Tratamiento	No. de capas		
Lote 1	FL-T-1	6%	94%	Tela	Ninguno	4	1.40	3.60
	FL-T-2	6%	94%	Tela	Ninguno	4	1.40	2.60
	FL-T-3	6%	94%	Tela	Ninguno	4	1.40	2.96
Lote 2	FL-C-1	13%	87%	Un sentido	Ninguno	2	1.00	3.00
	FL-C-2	13%	87%	Un sentido	Ninguno	2	0.96	3.06
	FL-C-3	13%	87%	Un sentido	Ninguno	2	1.09	3.09

Tabla 13. Descripción de las probetas ensayadas a flexión

El número de capas y porcentaje en volumen de fibras varía entre el lote 1 y el lote 2 pues se pretende comparar los resultados obtenidos de cada lote para evaluar cómo es que el aumento en el volumen de fibras naturales de una probeta afecta sus propiedades mecánicas.

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a tensión se procesaron y se insertaron en tablas, una para cada lote.

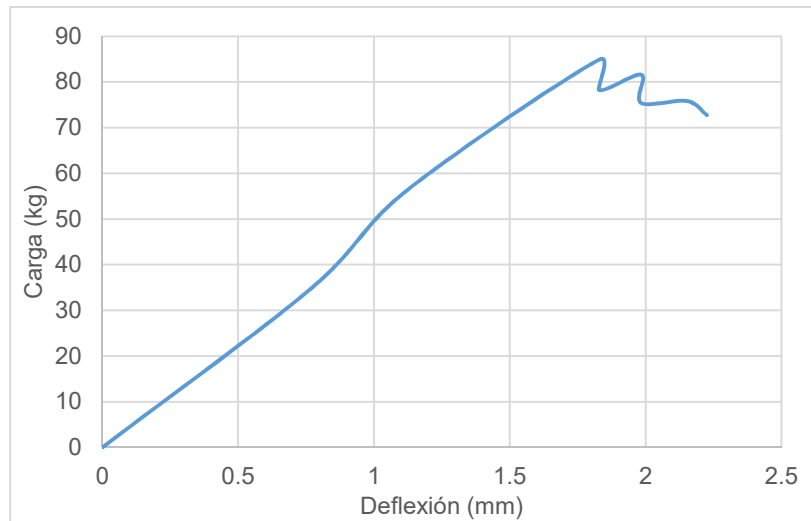
5.5.1 Resultados de las pruebas de resistencia a la flexión

Los resultados obtenidos de los ensayos a flexión se procesaron y se insertaron en dos tablas, una para cada tanda. Además se presenta las gráficas carga-deflexión para cada una de las probetas ensayadas.

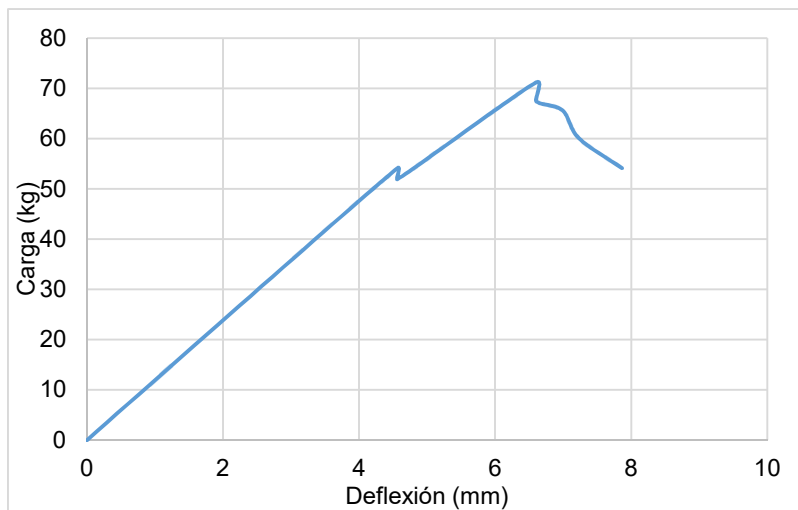
Resultados de los ensayos a flexión al lote 1					
Clave de la probeta	Carga aplicada (P) en kg	Distancia entre apoyos (L) en cm	Espesor de la probeta (d) en cm	Ancho de la probeta (b) en cm	$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$ en kg/cm ²
FL-T-1	84.88	16	1.40	3.60	288.69
FL-T-2	71.21	16	1.40	2.60	335.36
FL-T-3	93.13	16	1.40	2.96	385.26
Promedio					336.44
Desviación Estándar					48.29

Tabla 14. Resultados de los ensayos a flexión de la tanda 1

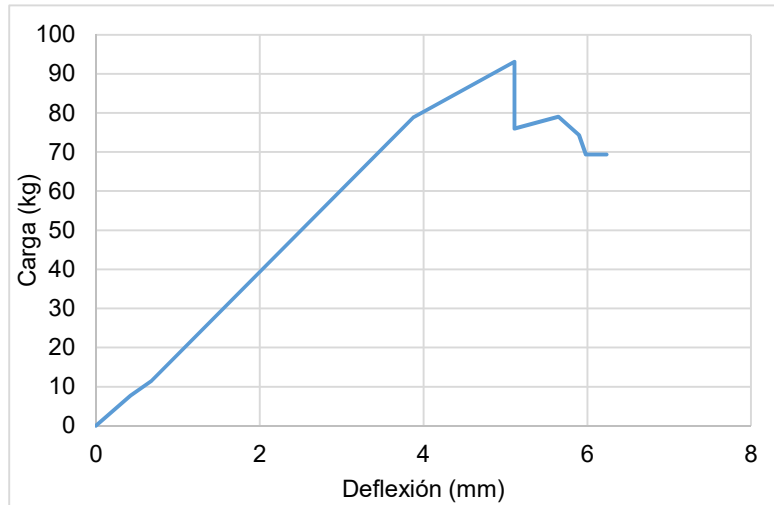
A continuación se presentan las gráficas carga-deflexión obtenidas de cada probeta ensayada del lote 1:



Gráfica 16. Carga-deflexión probeta FL-T-1



Gráfica 17. Carga-deflexión probeta FL-T-2

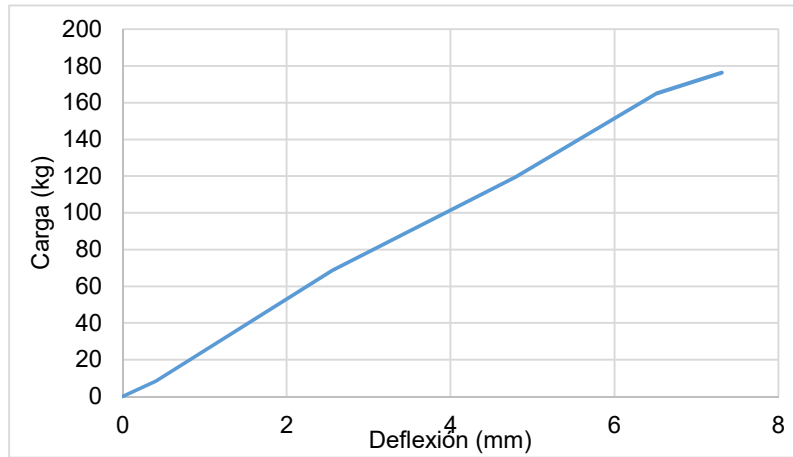


Gráfica 18. Carga-deflexión probeta FL-T-3

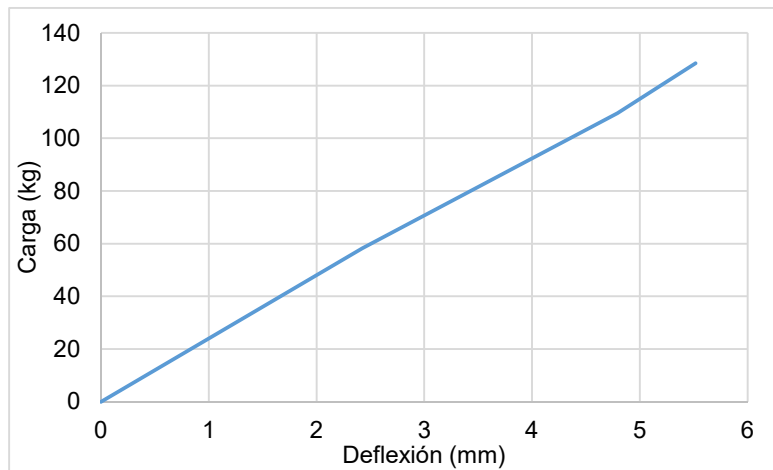
Resultados de los ensayos flexión a la tanda 2					
Clave de la probeta	Carga aplicada (P) en kg	Distancia entre apoyos (L) en cm	Espesor de la probeta (d) en cm	Ancho de la probeta (b) en cm	$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$ en kg/cm ²
FL-C-1	176.27	12.00	1.00	3.00	1057.62
FL-C-2	128.46	12.00	0.96	3.06	819.91
FL-C-3	141.59	12.00	1.09	3.09	694.21
Promedio					857.25
Desviación Estándar					184.56

Tabla 15. Resultados de los ensayos a flexión de la tanda 2

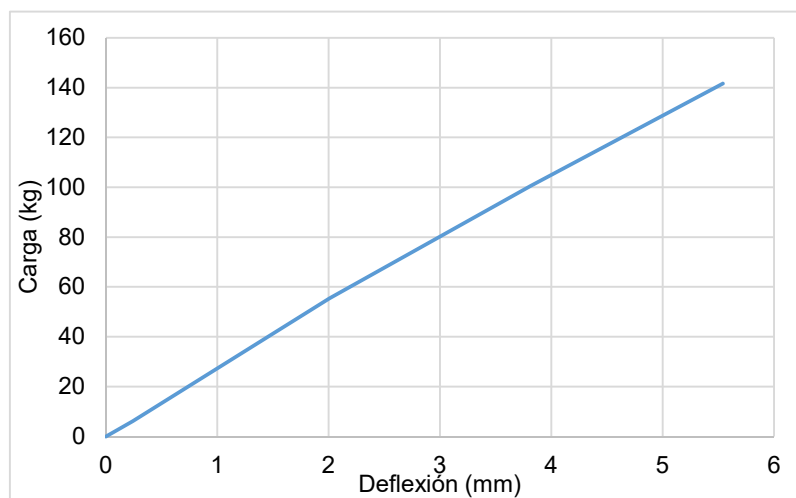
A continuación se presentan las gráficas carga-deflexión obtenidas de cada probeta ensayada del lote 2:



Gráfica 19. Carga-deflexión probeta FL-C-1



Gráfica 20. Carga-deflexión probeta FL-C-2



Gráfica 21. Carga-deflexión probeta FL-C-3

5.6 Prueba de resistencia a la tensión

Las pruebas de resistencia a tensión del material se realizaron bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM D-3039. En la siguiente ilustración se puede observar un ejemplo del procedimiento:



Ilustración 19. Ensayo a tensión de probetas de resina epoxica con refuerzo de fibras de henequén

Para estas pruebas se ensayaron 7 probetas, de las cuales sus características se describen en la siguiente tabla:

Descripción de las probetas ensayadas a tensión								
	Clave probeta	Composición (En volumen)		Fibra			Espesor (cm)	Ancho (cm)
		Fibra (%)	Resina (%)	Modalidad	Tratamiento	No. de capas		
Lote 1	T-FTT-1	7%	93%	Tela	Ninguno	2	0.98	3.32
	T-FTT-2	7%	93%	Tela	Ninguno	2	0.99	2.93
	T-FTT-3	7%	93%	Tela	Ninguno	2	0.91	3.06
Lote 2	T-FNT-1	8%	92%	Tela	NaOH	2	0.92	2.44
	T-FNT-2	8%	92%	Tela	NaOH	2	0.89	2.60
	T-FNT-3	8%	92%	Tela	NaOH	2	0.95	2.50
3	T-FNC-1	13%	87%	Continua	Ninguno	2	1.11	3.05

Tabla 16. Descripción de las probetas ensayadas a tensión

Se ensayan al menos tres probetas en cada lote para poder obtener resultados estadísticos confiables del comportamiento del material. Como su puede observar en la tabla anterior el lote 3 se compone de una sola probeta, este lote no tiene valor estadístico pero se considera importante observar el comportamiento de las probetas con las características de este lote.

5.6.1 Resultados de las pruebas de resistencia a tensión

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a tensión se procesaron y se insertaron en tres tablas, una para cada lote. Además se presenta las gráficas esfuerzo deformación para cada una de las probetas ensayadas.

Resultados de los ensayos a tensión al lote 1									
Clave de la probeta	Carga aplicada (p^{max}) en kg	Espesor de la probeta en cm	Ancho de la probeta en cm	Área (A) en cm ²	$F^{tu} = \frac{p^{max}}{A}$ en kg/cm ²	$\Delta\sigma$ kg/cm ²	$\Delta\epsilon$ cm/cm	Módulo elástico $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ kg/cm ²	Modo de fallo según ASTM D3039
T-FTT-1	907.64	0.98	3.32	3.24	280.40	78.7	0.014	5621.43	GAB
T-FTT-2	972.35	0.99	2.93	2.89	336.91	208.56	0.037	5636.76	GAB
T-FTT-3	588.57	0.91	3.06	2.77	212.53	61.26	0.006	10210.00	GAB
Promedio					276.61			7156.06	
Desviación Estándar					62.28			2644.80	

Tabla 17. Resultados de los ensayos a tensión de la tanda 1

A continuación se presenta una ilustración donde se puede apreciar el modo en que fallo cada una de las probetas ensayadas a tensión del lote 1:

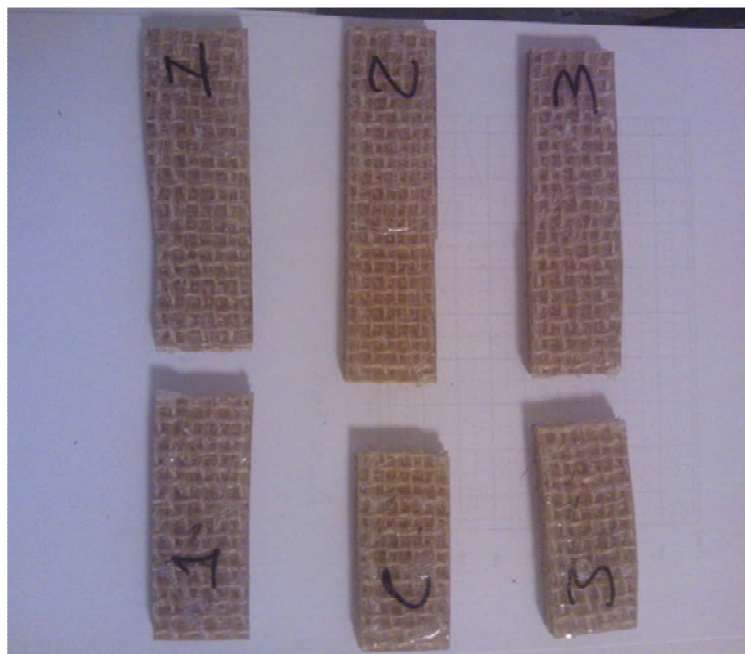
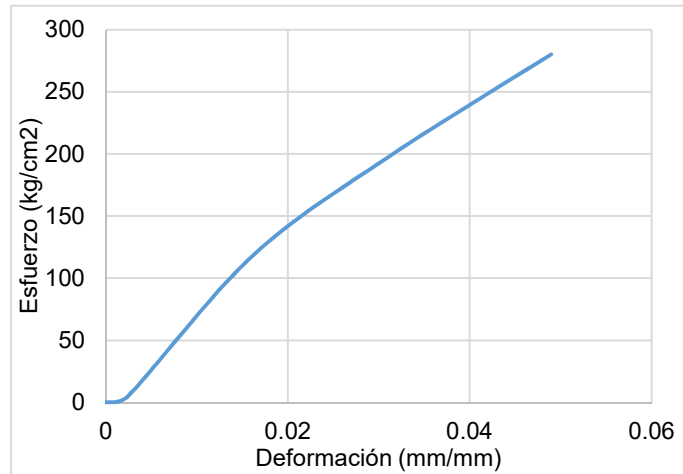
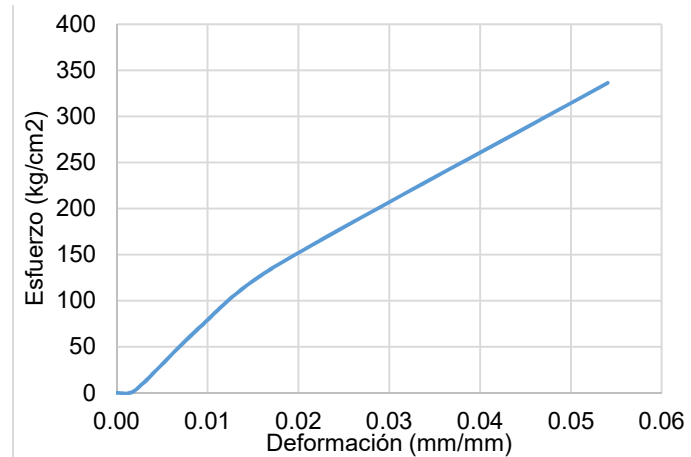


Ilustración 20. Probetas del lote 1 después de ser ensayadas a tensión

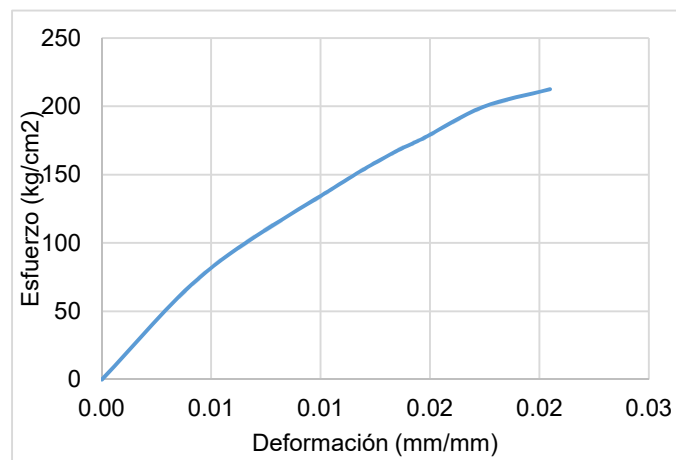
A continuación se incluye las gráficas esfuerzo-deformación que presentaron cada una de las probetas ensayadas a tensión del lote 1:



Gráfica 22. Esfuerzo-deformación Probeta T-FTT-1



Gráfica 23. Esfuerzo-deformación probeta T-FTT-2



Gráfica 24. Esfuerzo-deformación probeta T-FTT-3

Resultados de los ensayos a tensión a lote 2									
Clave de la probeta	Carga aplicada (p^{max}) en kg	Espesor de la probeta en cm	Ancho de la probeta en cm	Área (A) en cm ²	$F^{tu} = \frac{p^{max}}{A}$ en kg/cm ²	$\Delta\sigma$ kg/cm ²	$\Delta\epsilon$ cm/cm	Módulo elástico $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ kg/cm ²	Modo de fallo según ASTM-D-3039
T-FNT-1	786.83	0.92	2.44	2.24	350.51	73.19	0.009	8132.22	GAB
T-FNT-2	726.11	0.89	2.60	2.31	313.79	48.57	0.007	6938.57	GWM
T-FNT-3	793.56	0.95	2.50	2.38	334.13	115.32	0.009	12813.33	GAT
Promedio					332.81			9294.71	
Desviación Estándar					18.40			3105.11	

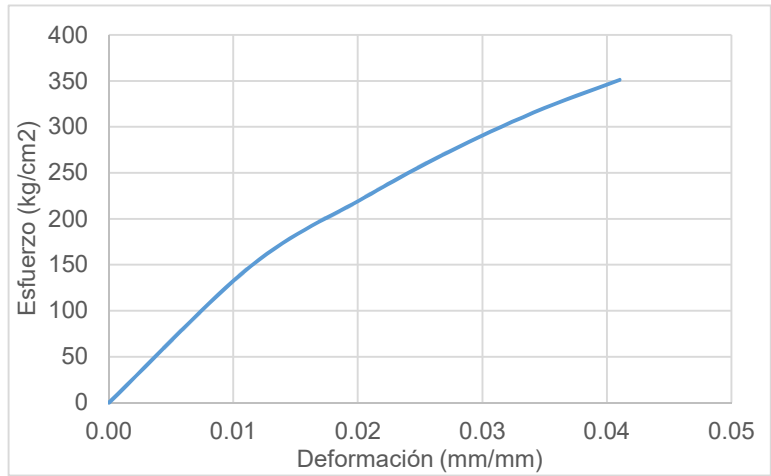
Tabla 18. Resultados de los ensayos a tensión a la tanda 2

A continuación se presenta una ilustración donde se puede apreciar el modo en que fallo cada una de las probetas ensayadas a tensión del lote 2:

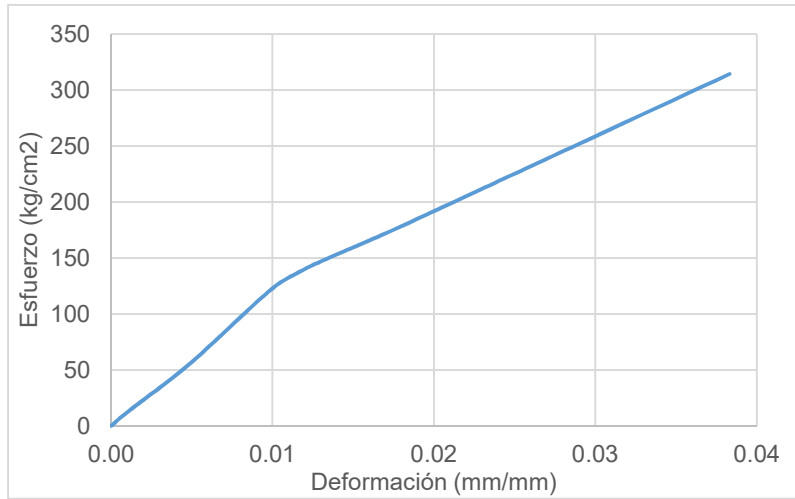


Ilustración 21. Probetas del lote 2 después de ser ensayadas a tensión

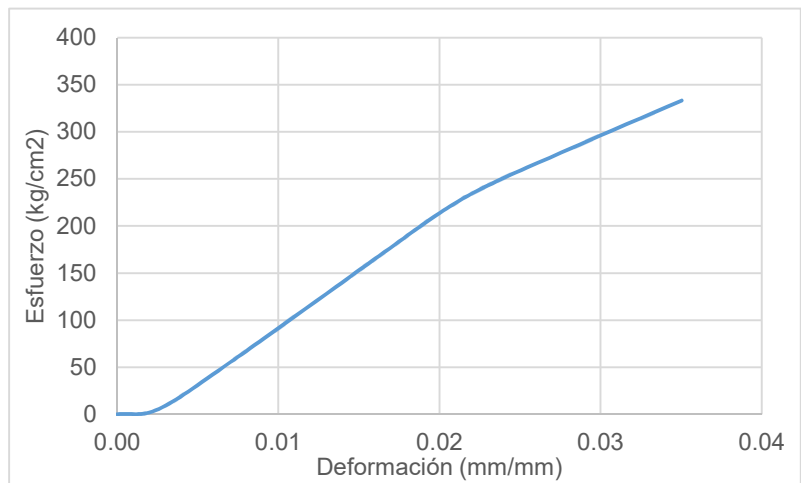
A continuación se incluye las gráficas esfuerzo-deformación que presentaron cada una de las probetas ensayadas a tensión del lote 2:



Gráfica 25. Esfuerzo-deformación probeta T-FNT-1



Gráfica 26. Esfuerzo-deformación probeta T-FNT-2



Gráfica 27. Esfuerzo-deformación probeta T-FNT-3

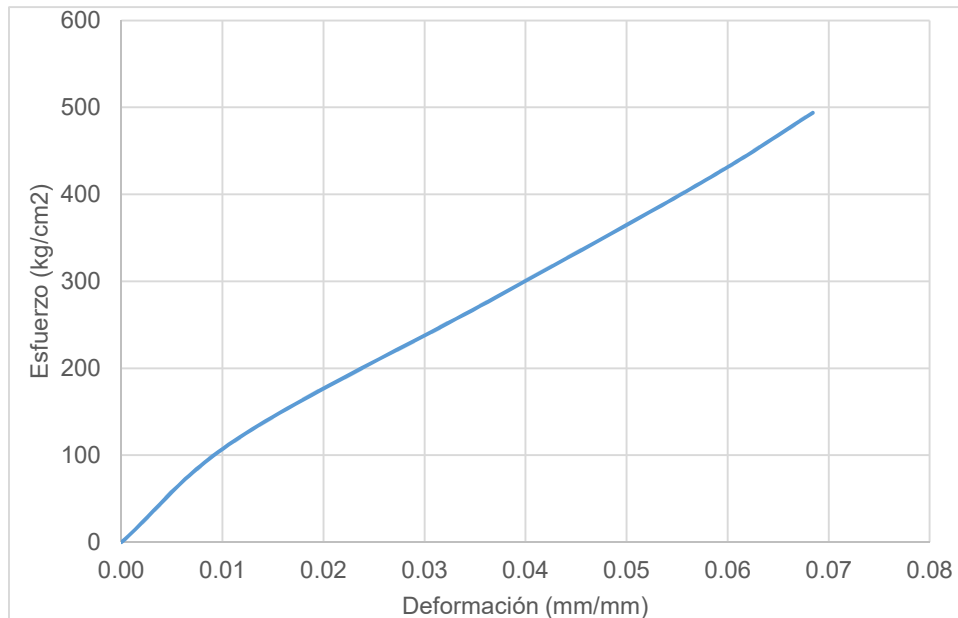
Resultados de los ensayos a tensión del lote 3									
Clave de la probeta	Carga aplicada (p^{max}) en kg	Espesor de la probeta en cm	Ancho de la probeta en cm	Área (A) en cm ²	$F^{tu} = \frac{p^{max}}{A}$ en kg/cm ²	$\Delta\sigma$ kg/cm ²	$\Delta\epsilon$ cm/cm	Módulo elástico $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ kg/cm ²	Modo de fallo según ASTM-D3039
T-FNC-1	1674.24	1.11	3.05	3.39	494.53	138.41	0.02	6920.50	GAB

Tabla 19. Resultados de los ensayos a tensión de la tanda 3

A continuación se presenta una ilustración donde se puede apreciar el modo en que fallo cada una de las probetas ensayadas a tensión del lote 3:



A continuación se incluye las gráficas esfuerzo-deformación que presentaron cada una de las probetas ensayadas a tensión de la lote 3:

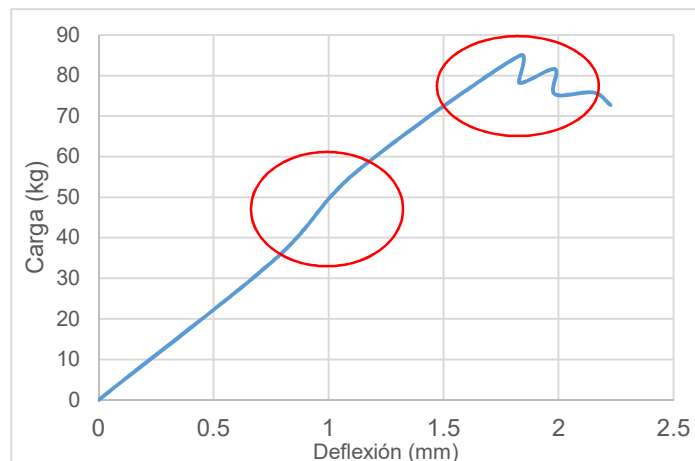


Grafica 28. Esfuerzo deformación probeta T-FNC-1

5.7 Análisis y Discusión de resultados

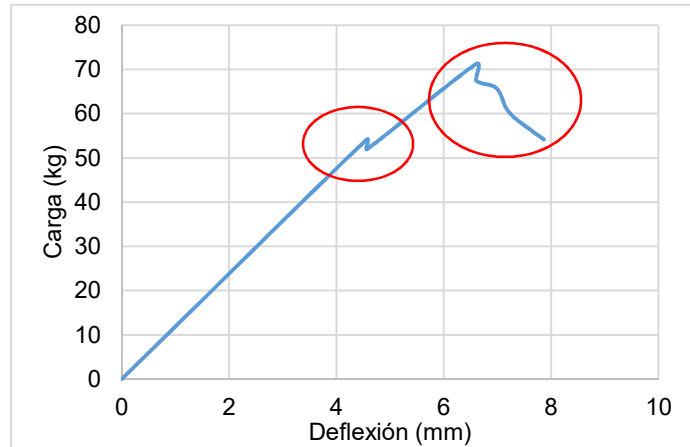
5.7.1 De las pruebas de resistencia a flexión

- Todas las probetas del lote 1 se comportaron de manera similar, teniendo una deformación elástica lineal, seguidas de deformaciones plásticas de menor magnitud, hasta alcanzar su resistencia máxima y luego presentar una falla de manera escalonada, gracias a las fibras naturales en forma de tela introducidas, a continuación se hace un análisis de las gráficas desarrolladas por cada probeta durante la prueba de resistencia a flexión:
 - En la gráfica 16 correspondiente a la probeta FL-T-1, cuando la carga alcanza 38kg, se presenta un aumento en la pendiente de la gráfica, de lo que se deduce que en este punto las fibras empiezan a soportar esfuerzos aplicados, a continuación la probeta cambia de deformación elástica a plástica hasta que llega a su resistencia máxima de 288.69kg/cm^2 , con una carga de 84.88kg , en este punto se puede observar que falla de la resina y se presenta una reducción en la carga resistida, sin embargo la tela de fibras naturales entra en acción lo que causa que la probeta vuelva a resistir esfuerzos y se presente la falla de manera escalonada en vez de existir una falla total.



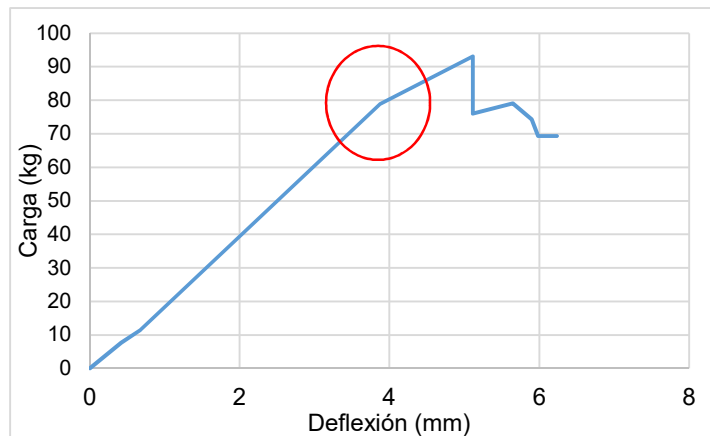
Gráfica 16. Carga-deflexión probeta FL-T-1

- En la gráfica 17 correspondiente a la probeta FL-T-2, podemos observar una deformación elástica lineal hasta que llega a una carga de 54.15kg en donde se presenta una falla en la resina y se observa una leve pérdida de resistencia que inmediatamente es recuperada por las fibras naturales, a partir de este punto la probeta presenta deformaciones elásticas hasta llegar al esfuerzo máximo resistido que fue de 335.36kg/cm^2 con una carga de 71.21kg y luego una falla de manera escalonada igual que en la gráfica 16.



Gráfica 17. Carga-deflexión probeta FL-T-2

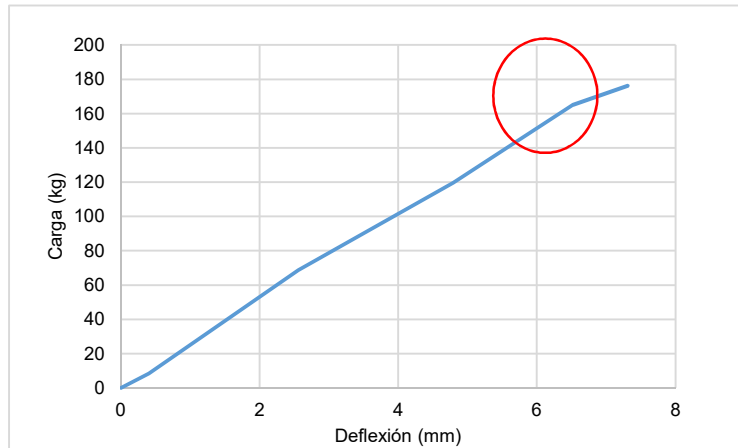
- En la gráfica 18 correspondiente a la probeta FL-T-3, se puede observar una deformación elástica lineal hasta una carga de 78.84kg, en ese punto se aprecia como la pendiente de la gráfica disminuye, que se interpreta como una transición hacia una deformación plástica, a partir de esta transición se alcanza la resistencia máxima de la probeta, que fue de 385.26kg/cm² con una carga de 93.13kg y luego una falla escalonada como en las gráficas 16 y 17.



Gráfica 18. Carga-deflexión probeta FL-T-3

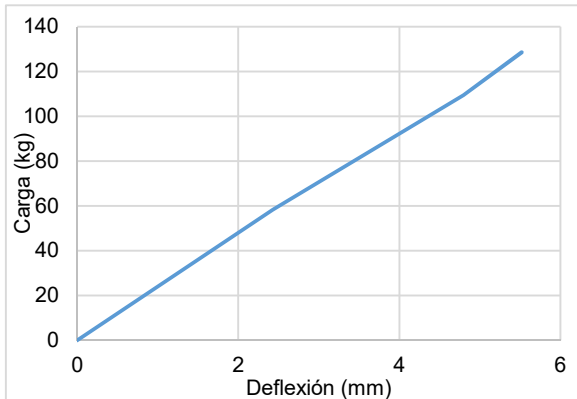
- En el caso de las probetas del lote 2, en las cuales las fibras estaban arregladas de manera continua unidireccional perpendiculares a la dirección de la carga, se observó un comportamiento diferente al de las probetas del lote 1. Se presenta principalmente una deformación elástica y una fractura frágil, perdiendo toda capacidad de resistir esfuerzos. A continuación se presenta el análisis de las gráficas:

- La probeta FL-C-1 presenta, como ya se mencionó, mayormente deformación elástica, con una pequeña sección de deformación plástica y luego una falla frágil.

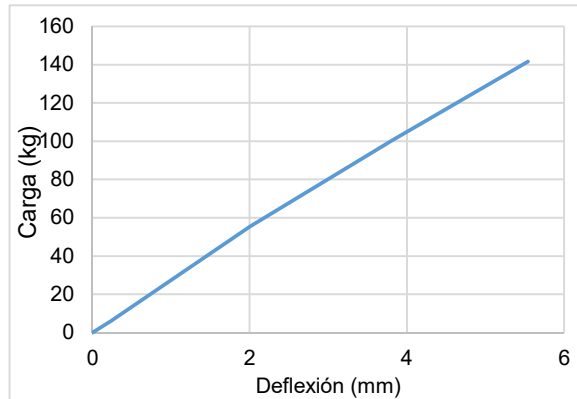


Gráfica 19. Carga-deflexión probeta FL-C-1

- Las probetas FL-C-2 y FL-C-3 presentaron ambas una deformación elástica y luego una fractura frágil.



Gráfica 20. Carga-deflexión probeta FL-C-2



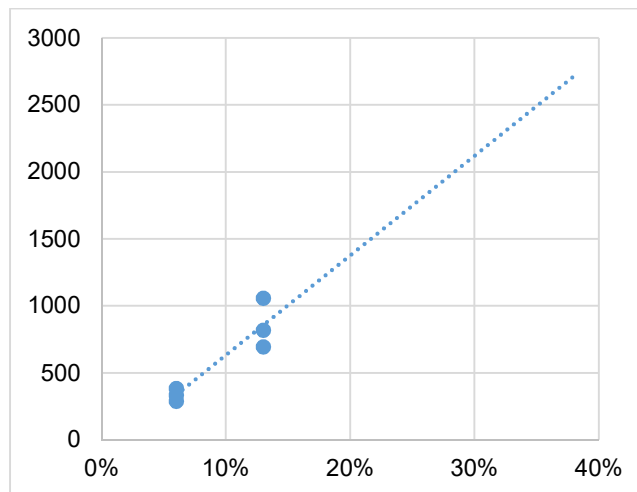
Gráfica 21. Carga-deflexión probeta FL-C-3

- Las probetas del lote 1 presentaron, en promedio, resistencia máxima a la flexión de 336.44kgm/cm².
- Las probetas del lote 2 presentaron, en promedio, resistencia máxima a la flexión de 857.23 kg/cm².
- Se observó que las probetas de la tanda 2 obtuvieron mejor capacidad de deformación que las probetas de la lote 1. **Esto demuestra el volumen de fibras afecta directamente la resistencia del material.** Sin embargo, es necesario hacer notar que, en ningún caso se alcanzó la resistencia de la ficha técnica de la matriz sin refuerzo.

Comparación del esfuerzo a flexión de las probetas ensayadas		
Clave de la probeta	Resistencia a flexión (kg/cm ²)	Volumen de fibra (%)
FL-T-1	288.69	6%
FL-T-2	335.36	6%
FL-T-3	385.26	6%
Promedio	336.44	
FL-C-1	1057.62	13%
FL-C-2	819.91	13%
FL-C-3	694.21	13%
Promedio	857.25	
Resina sin refuerzo (valor obtenido de la ficha técnica)	1200 kg/cm²	

Tabla 20. Comparativa de los resultados de los ensayos a flexión

- Para obtener los mejores resultados es necesario incrementar el volumen de fibras del compuesto, por falta de tiempo no se pudo realizar estos cambio en el laboratorio, por lo que para demostrar esto, se graficaron los datos de la tabla anterior y se insertó una línea que representa la tendencia de aumento según la cantidad de fibras. En esta gráfica podemos observar, que logrando un compuesto con un volumen de refuerzo del 40%, obtendremos valores cerca de los 2500kg/cm² de resistencia a la flexión. Este solo es un valor aproximado, debido principalmente la variabilidad de las propiedades de las fibras, se observaran desviaciones considerables con esta predicción.



Gráfica 29. Tendencia de incremento de resistencia a la flexión según el volumen de refuerzo del compuesto epoxi-henequén

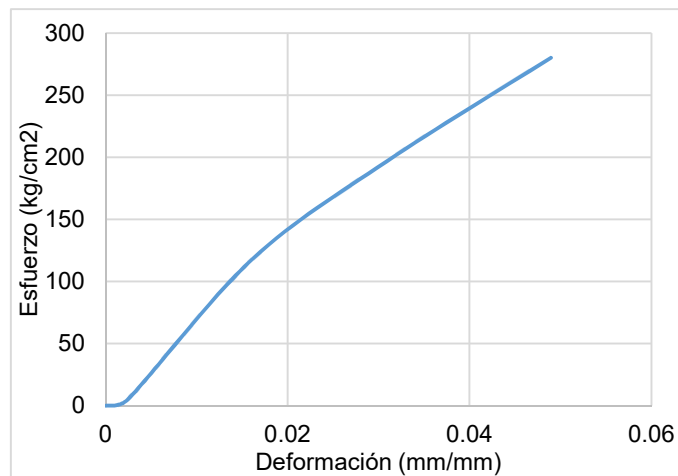
- También es importante observar la desviación estándar de las pruebas. La desviación estándar de la resistencia a flexión del lote 1 fue de 48.29kg/cm², mientras que este valor fue de 184.56kg/cm² para el lote 2. Esto se atribuye a las fibras naturales, las cuales es normal que presenten una alta variabilidad en sus propiedades mecánicas. Por esta misma razón cuando los compuestos presentan un mayor porcentaje de fibra natural en su composición, al mismo tiempo que se

incrementa su resistencia máxima a los esfuerzos también se incrementara la desviación estándar de estos valores.

- La función de la resina es dar forma y transferir los esfuerzos externos al refuerzo que contiene y en segundo plano queda su resistencia (que también contribuye) por eso era de esperarse que si las fibras naturales tienen alta variabilidad también sus compuestos con matriz de resina epoxica presenten altos valores de desviación como se observó en los experimentos realizados.

5.7.2 De las pruebas de resistencia a tensión

- Como se observó en las gráficas presentadas, todas las probetas ensayadas se comportaron de manera similar bajo esfuerzos a tensión. Se presentaba una deformación elástica no lineal hasta alcanzar la resistencia máxima, inmediatamente después se presenta una fractura frágil en el sentido perpendicular a la carga aplicada.



Gráfica 22. Esfuerzo-deformación Probeta T-FTT-1

- Las probetas del lote 1, presentaron, en promedio, una resistencia máxima a la tensión de 276.61 kg/cm² y un módulo elástico de 7156.06 kg/cm².
- Las probetas del lote 2, presentaron, en promedio, una resistencia máxima a la tensión de 332.81kg/cm², y un módulo elásticos de 9294.71 kg/cm².
- El lote 3 se compuso solo de una probeta, lo cual no tiene valor estadístico, sin embargo a partir de los observado de sus resultado, junto con lo observado en prueba de flexión, podemos concluir que el incremento en el volumen de fibra en los compuestos, se relaciona directamente con el aumento en la resistencia a los esfuerzos de dichos compuestos.
- El tratamiento químico con hidróxido de sodio aplicado a las fibras mejoró la adhesión matriz-refuerzo (fibra). Esto se demuestra mediante la comparación de los resultados obtenidos, pues el promedio de esfuerzo a tensión resistido por las probetas del lote 2 las cuales contenían fibras tratadas químicamente fue un 20.3% mayor, que el esfuerzo máximo resistido por las probetas del lote 1 que no fueron tratadas químicamente.

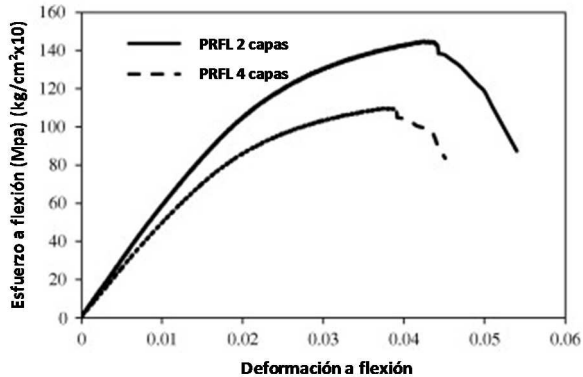
- El tratamiento químico utilizado en estos experimentos también incrementara el módulo elástico de los compuestos que contengan fibras naturales tratadas. Esto se deduce a partir de la comparación el promedio de los módulos elásticos del lote 1 y lote 2, ya que el promedio del lote 2 fue un 29.9% mayor que aquel del lote 1.
- También es prudente comparar los valores de desviación estándar del lote 1 y lote 2. La desviación estándar de los valores de resistencia máxima a la tensión que presento el lote 1 fue de 62.28kg/cm² mientras que los valores presentados por el lote 2 tuvieron una desviación estándar de 18.40kg/cm². Lo que nos lleva a concluir que el tratamiento químico utilizado también contribuye a uniformizar las propiedades mecánicas de las fibras.
- Se hace notar que no se superó el valor de esfuerzo máximo a tensión resistido por la resina sin refuerzo (según lo reportado por el proveedor). Sin embargo, comparando el esfuerzo máximo a tensión resistido por las probetas de la tanda 1, contra el esfuerzo máximo resistido por la probeta de la tanda 3, podemos observar que la resistencia aumenta con el volumen de refuerzo (fibras) del compuesto. En este caso no es posible hacer una predicción mediante una proyección lineal debido a que solo existen un valor de la tanda 3 y no es representativo.

Comparación de los resultados de los ensayos a tensión			
Clave de la probeta	Volumen de fibra (%)	Resistencia a tensión (kg/cm ²)	Módulo elástico (kg/cm ²)
T-FTT-1	7%	280.40	5621.43
T-FTT-2	7%	336.91	5636.76
T-FTT-3	7%	212.53	10210.00
Promedio		276.61	7156.06
T-FNT-1	7%	350.51	8132.22
T-FNT-2	7%	313.79	6938.57
T-FNT-3	7%	334.13	12813.33
Promedio		332.81	9294.71
T-FNC-1	13%	494.53	6920.50
Resina sin refuerzo		800kg/cm ²	

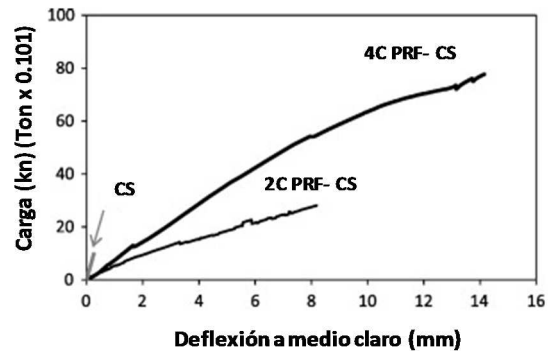
Tabla 21. Comparación de los resultados de los ensayos a flexión

6. CRITERIOS DE ANÁLISIS A PARTIR DE LOS EXPERIMENTOS

Con los datos obtenidos en los experimentos podemos hacer una comparativa con los artículos presentados en el apartado 4.2 de este documento. Como se puede observar en la siguiente gráficas (la que se encuentra a la izquierda), el polímero reforzado con fibras de lino que desarrollaron estos autores tuvo una resistencia a la flexión de 1400kg/cm^2 . Con este polímero lograron crear una probeta de núcleo de concreto con coraza de del polímero, que resistió una carga de 8 toneladas (como se muestra en la gráfica de la derecha), la cual tenía una diámetro de 30cm y el claro de la prueba fue de 52.5cm.

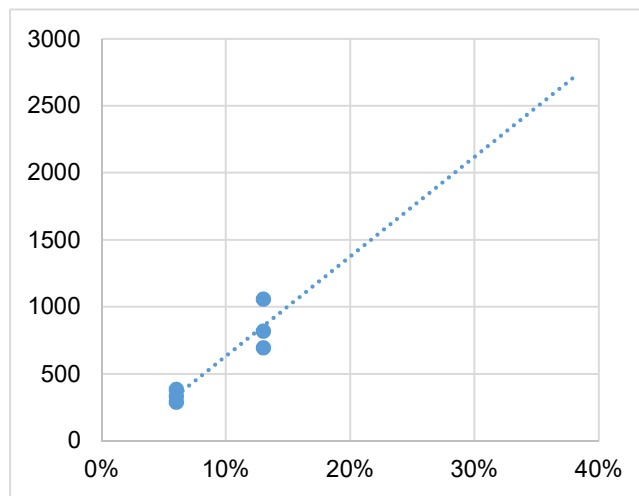


Gráfica 9. Curva de flexión- deformación de los FRP reforzados con lino (Yan & Chou, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013)



Gráfica 13. Curva de deflexión a medio claro del PRFL-CS (Yan & Chou, Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column, 2013).

Si comparamos con estos resultados, los obtenidos en nuestro proceso de experimentación:



Gráfica 24. Tendencia de incremento de resistencia a la flexión según el volumen de refuerzo del compuesto epoxi-henequén

Se puede observar que con un volumen de fibra del 25% estaremos aproximadamente en los mismos valores, y con un 40% de volumen de fibra pueden ser superados. Esto quiere decir que la capacidad de resistencia contra distintos esfuerzos del material que se investigó se podría considerar como suficientes para poder utilizarlo para crear elementos de concreto confinados con nuestro material que sean capaces de resistir esfuerzos de flexión.

Pero si comparamos nuestro material con el material que se utiliza tradicionalmente para el refuerzo del acero, las varillas corrugadas grado 4200, el material investigado se queda muy corto en capacidades mecánicas, obtuvimos una resistencia máxima a la tensión de 494.53kg/cm^2 que se prevé se puede aumentar hasta los 2000kg/cm^2 , además no presenta fluencia, falla inmediatamente después de alcanzar su límite elástico, las varillas corrugadas poseen un límite de fluencia de 4200kg/cm^2 y una resistencia máxima a la tensión de 5300kg/cm^2 (Fierro de Occidente S.A. de C.V., 2015).

Además se presentan otras variables que anulan la viabilidad de nuestro material para su uso estructural:

- Las normas técnicas complementarias para la construcción de estructuras de concreto del reglamento de construcción del D.F. (Gobierno del Distrito Federal, 2004), marcan en el apartado 1.33 que estas estructuras deben tener una vida útil de al menos 50 años, de este material no se conoce su vida útil, pero se sabe que es mucho más corta ya que la humedad estará más presente en las fibras para reducir dicha vida útil.
- Estas mismas normas, en su apartado 2.22 marcan que en los elementos sujetos a flexión el acero deberá calcularse para el 90% de la falla balanceada, con el fin de que el concreto alcance sus valores de resistencia críticos antes que el acero y así producir una falla dúctil en los elementos de concreto. El material con el cual se investigó presentó una falla frágil ante esfuerzos críticos, lo que quiere decir que una estructura de concreto reforzada con este material presentaría una falla frágil en lugar de dúctil como lo marca la norma
- También la resistencia contra el fuego del material es muy baja inclusive puede llegar a perder sus propiedades mecánicas si se alcanzan los 85°C que es la temperatura de transición vítrea de la resina epoxica utilizada como matriz.
- Otro factor ambiental que afecta las propiedades mecánicas del material será la luz ultravioleta, que afecta negativamente tanto a la matriz como a las fibras.
- Si bien este material puede actuar como una adhesión a las vigas de concreto existentes para incrementar su resistencia a la flexión (absorbiendo principalmente la tensión presentada), sin embargo este refuerzo depende radicalmente de la capacidad de dicha viga para absorber las compresiones adicionales y de la cimentación existente para resistir las cargas extras, por lo tanto no puede ser considerado aun como material que pueda reforzar los esfuerzos adoptados por una viga.
- Aunque los problemas de absorción de humedad, resistencia contra el fuego, absorción de los rayos UV y degradación puede ser resueltos mediante tratamientos y modificaciones químicas aplicadas tanto a la matriz como al refuerzo de fibras, el modo de fallo no es posible corregirlo. Por el momento el costo del material aún es muy elevado debido al uso de la matriz polimérica.

A continuación se presenta la matriz del costo unitario (que fue elaborada el programa Neodata) para producir 1m² de nuestro material. Este cálculo es para unos elementos que contenga 94% de volumen en resina y 6% de volumen en fibra

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Código	Concepto	Unidad	Costo	cantidad	Importe	%
Análisis: RESH Unidad: M2						
RESINA EPOXICA REFORZADA CON TEXTIL DE HENEQUEN						
MATERIALES						
	RESINA EPOXICA EPOLAM 2015	KG	\$255.00	6.880000	\$1,754.40	
	TEXTIL DE FIBRAS DE HENEQUEN	M2	\$80.77	4.200000	\$339.24	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
	HERRAMIENTA MENOR	%	\$67.34	0.030000	\$2.02	0.09%
	Subtotal: EQUIPO Y HERRAMIENTA				\$2.02	0.09%
MANO DE OBRA						
	CUADRILLA No 21 (1 TECNICO+ 1 AY.ESP.)	JOR	\$1,010.06 /	15.000000	\$67.34	3.11%
	Subtotal: MANO DE OBRA				\$67.34	3.11%
	Costo directo				\$2,163.00	

Tabla 22. Matriz de Precio unitario del material investigado (elaboración Propia)

Como se puede ver el elevado costo lo causa la resina, por lo que se puede concluir que mientras incrementa el volumen utilizado de fibra, se reducirá considerablemente el costo de nuestro material.

Por estas razones es mejor darle aplicaciones arquitectónicas a este material, donde los usuarios de una edificación no se verían afectados en caso de su falla repentina. Una aplicación viable sería como fachadas, donde presentaría ventajas contra otros materiales utilizados usualmente en este rubro. A continuación se presenta una tabla comparativa, para comprobar las afirmaciones anteriores.

Material	Peso volumétrico (kg/m ³)	Espesor cuando se aplica en fachadas (mm)	Peso por m ² de la fachada (kg/m ²)
Concreto polimérico	1500 a 2400	15	22.5
Concreto hidráulico	2200	50-100	220
Concreto reforzado con fibra de vidrio	1900-2100	15	28.5
Polímero reforzado con fibras naturales	1100-1200	10	11

Tabla 23. Comparativa de materiales utilizados comúnmente en fachadas (Elaboración propia)

Como se puede apreciar la mayor ventaja será en peso, lo que provocara ahorros en otros rubros del proyecto. Sin embargo si comparamos nuestro material contra el concreto hidráulico (que se consideró sin refuerzo por cuestiones de simplicidad) tendremos que el concreto hidráulico cuesta solo \$120/m² mientras nuestro material esta alrededor de los \$2000/m² (Solo se comparó el precio para crear una placa de 1mx1mx0.1m de material, no se consideran elementos como acabados, placas de sujeción, izaje y colocación).

CONCLUSIONES

- El henequén puede actuar como una fibra natural y ecológica viable para el refuerzo de materiales compuestos en nuestro país, debido a la poca energía que se necesita para su manufactura, su biodegradabilidad, bajo costo, propiedades mecánicas, disponibilidad y el hecho de que no emite toxicidad de ningún tipo. Sin se requiere llevar a cabo una investigación que plantee análisis de su ciclo de vida, debido a que esta solo constituye el 2% de la planta de la que se extrae y el 98% restante de dicha planta no tiene ningún uso por lo que generalmente es quemado, práctica que no se considera sustentable.
- La resina epoxica se utilizó como matriz por sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y baja expansión térmica. Esta resina tiene la función de dar forma al material compuesto, transmitir los esfuerzos uniformemente al material de refuerzo y proteger las fibras de agentes externos, pero no evitó que las probetas presentaran altos valores de desviación estándar causados por la variabilidad de las propiedades de las fibras naturales. Su costo dentro del mercado aun es elevado, lo que limita su aplicación.
- El generar investigación en la implementación de las fibras naturales es viable en términos de generación de recursos de bajo impacto ambiental, ya que la principal preocupación ambiental se encuentra en el uso de matrices derivadas del petróleo.
- Uno de los principales problemas relacionados con polímeros reforzados con fibras naturales es la absorción de humedad. La humedad dentro de estos compuestos causa la disminución y eventualmente pérdida total de las propiedades mecánicas. Esto sucede cuando el aumento de volumen en las fibras desarrolla esfuerzos en las regiones de la interface, provocando microfractura en la matriz alrededor de las fibras hinchadas, esto tiene como efecto una pobre transferencia de esfuerzos entre la matriz y el refuerzo. Además la presencia de humedad en las fibras también facilita los ataques provenientes de microorganismos (biodegradación).
- Los polímeros termofijos presentan un comportamiento frágil ante los esfuerzos, es decir, una vez que la deformación supera la región elástica estos sufren una fractura total, no existe deformación plástica. La introducción del refuerzo de fibra natural aumenta la capacidad de deformación elástica, sin embargo no cambia el comportamiento frágil del material, lo que quiere decir que nuestro material presenta poca o nula deformación plástica. Sin embargo, durante las pruebas de flexión, las probetas reforzadas con tela de fibras naturales presentaron un comportamiento que se podría interpretar como elástico, esto debido a que una vez que se fracturo la matriz la tela logro detener la propagación fractura evitando la ruptura total y además siguió soportando los esfuerzos aplicados(ver gráficas 16-18).
- La resistencia máxima a la flexión alcanzada en los experimentos fue de 857kg/cm², con una probeta con un 13% de volumen de fibras de refuerzo. Mientras que las probetas con un 6% solo alcanzaron 336.44kg/cm², por lo que se prevé que fabricando una probeta con el 40% (Hasta el 60% de volumen de refuerzo puede

ser introducido) la resistencia a la flexión será de entre 2300 y 2700kg/cm² (ver gráfica 22).

- La resistencia máxima a la tensión alcanzada en los experimentos fue de 494.53 kg/cm² con una probeta con un volumen de fibra de refuerzo del 7%. Al igual que con las pruebas de flexión, el aumento del volumen de fibra de refuerzo también provocara el aumento en la resistencia a la tensión del compuesto.
- Los valores obtenidos de las pruebas de resistencia a la tensión y a la flexión nos llevan a concluir que este material no es viable para aplicarlo como refuerzo de elementos de concreto, por dos razones:
 - Los valores de resistencia a los esfuerzos son muy bajos cuando se comparan con los del acero de refuerzo tradicional (varillas corrugas) que son de 5300kg/cm² a la tensión.
 - Los altos valores de desviación estándar presentados en ambas pruebas, nos llevan a concluir que el material no debe ser aplicado donde su posible falla pueda ocasionar pérdida de vidas humanas, esto debido a que su comportamiento ante los esfuerzos no es constante y puede variar de una sección a otra.
- La matriz polimérica y la fibra de refuerzo presentan una baja adhesión debido a la naturaleza hidrofóbica al ser un material polimérico y la naturaleza hidrofílica de la segunda. Durante la experimentación, las fibras fueron sometidas a un tratamiento químico de alcalinización con hidróxido de sodio, con el propósito de mejorar la adhesión matriz-fibra. Dichas fibras fueron utilizadas en probetas que se ensayaron a tensión y se compararon con probetas sin tratamiento químico. Las probetas con fibras tratadas tuvieron una resistencia máxima a la tensión, en promedio, 20.3% mayor que las probetas que tenían fibras sin tratar. El módulo elástico de las probetas con fibras tratadas fue, en promedio, 29% mayor que el de las probetas sin tratar. Se observó un resultado inesperado, la desviación estándar de la resistencia máxima a tensión de las probetas con fibras tratadas fue solo de un tercio de la desviación estándar que se observó en las probetas sin tratar. Lo que nos lleva a concluir que la alcalinización también ayuda a equilibrar las propiedades mecánicas de las fibras naturales, las cuales en general presentan propiedades muy variables.
- Las limitantes para aplicaciones estructurales para este material son:
 - Las normas técnicas complementarias para la construcción de estructuras de concreto del reglamento de construcción del D.F. (Gobierno del Distrito Federal, 2004), marcan en el apartado 1.33 que estas estructuras deben tener una vida útil de al menos 50 años, de este material no se conoce su vida útil, pero se sabe que es mucho más corta y la humedad atacara las fibras para reducir dicha vida útil.
 - Estas mismas normas, en su apartado 2.22 marcan que en los elementos sujetos a flexión el acero deberá calcularse para el 90% de la falla balanceada, con el fin de que el concreto alcance sus valores de resistencia críticos antes que el acero y así producir una falla dúctil en los elementos de

concreto. Nuestro material presenta una falla frágil ante esfuerzos críticos, lo que quiere decir que una estructura de concreto reforzada con este material presentaría una falla frágil en lugar de dúctil como lo marca la norma.

- También la resistencia contra el fuego del material es muy baja inclusive puede llegar a perder sus propiedades mecánicas si se alcanzan los 85° C que es la temperatura de transición vítrea de la resina epoxica utilizada como matriz.
- Otro factor ambiental que afecta las propiedades mecánicas del material será la luz ultravioleta, que afecta negativamente tanto a la matriz como a las fibras.
- Este material actuaría como una adhesión a las vigas de concreto existentes para incrementar su resistencia a la flexión (absorbiendo principalmente la tensión presentada), sin embargo este refuerzo también depende de la capacidad de dicha viga para absorber las compresiones adicionales y de la cimentación existente para resistir las cargas extras.
- El uso más recomendable para el material serán aplicaciones arquitectónicas, como fachadas prefabricadas, en donde sus esfuerzos no forman parte del sistema estructural. Su mayor cualidad, contra otros materiales que se utilizan tradicionalmente para construir estos elementos, será su bajo peso volumétrico, como se puede observar en la siguiente tabla comparativa:

Material	Peso volumétrico (kg/m ³)	Espesor cuando se aplica en fachadas (mm)	Peso por m ² de la fachada (kg/m ²)
-Concreto polimérico	1500 a 2400	15	22.5
-Concreto hidráulico	2200	50-100	220
-Concreto reforzado con fibra de vidrio	1900-2100	15	28.5
-Polímero reforzado con fibras naturales	1100-1200	10	11

Tabla 22. Comparativa de materiales utilizados comúnmente en fachadas (Elaboración propia)

- Sin embargo su costo supera ampliamente a los materiales tradicionales. El precio por metro cuadrado de nuestro material se encuentra en \$2163, pesos.
- El alto costo del material se debe principalmente a la resina epoxica, por lo que el incremento del volumen de fibra en el compuesto, también se traducirá en una reducción del costo. Esto se puede observar en tabla 22 correspondiente a la matriz de precio unitario del material investigado.

- En esta se observa que el elemento de mayor costo es la resina, entonces si incrementamos el volumen de fibra se reducirá el volumen de resina y por lo tanto el costo del material.

Recomendaciones:

- Investigar sobre el uso de otras matrices, como el polyester no saturado, polímeros termoplásticos y biopolímeros.
- Hacer uso de fibras cortas en orden aleatorio, lo que también abriría la posibilidad de hacer adecuaciones geométricas como en el apartado 4.3 de este documento.
- El estudio de otros procesos de manufactura más industrializados y eficientes.
- En esta investigación solo se trató con el problema de la adhesión y absorción de humedad, es necesario probar otros arreglos químicos para mejorar el comportamiento del material ante la intemperie y el fuego.
- Obtener las propiedades térmicas y acústicas del material.
- Es necesario hacer estudios de vida útil del material para poder utilizarlo en todo su potencial.

REFERENCIAS

Libros

- Bank, L. C. (2006). *Composites for Construction: Structural Design FRP with Materials*. Hooboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Brandt, A. M. (2009). *Cement- Based Composites Second Edition, Materials, mechanical properties and performance*. New York: Taylor & Francis.
- Callister, W. (2009). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Limusa Wiley.
- Hollen, J., Langford, A., & Saddler, J. (1987). *Introducción a los textiles*. México.
- Mazars, J., & Millard, A. (2009). *Dynamic Behavior of Concrete and Seismic Engineering*. E.U.A.: ISTE Ltd.
- Mohnty, A., Misra , M., & Drzal, L. (2005). *Natural Fibers, biopolymers and biocomposites*. E.U.A.: Taylor & Francis Group.

Artículos

- Alvarado Juarez, C., & Rodriguez Lopez, P. (2004). Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. *Ingenierias Vol. VII No. 22*, 7-19.
- Azwa, Z., Yosif, B., Manalo, A., & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites bases on natural fibres. *Materials and Design 47 EL SERVIER*, 424-442.
- Burgueño, R., Quagliata, M., Mohanty, A., Mehta, G., Drzal, L., & Misra, M. (2004). Load-bearing natural fiber composite cullular beams and panels. *Composites: PART A 35*, 645-656.
- Dittember, D., & GangaRao, H. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infraestructure. *ELSEVIER Composites: Part A 43*, 1419-14229.
- Kicinska-Jakubowska, A., Bogacz, E., & Zimniewska, M. (2012). Review of natural fibers. Part 1 Vegetable fibers. *Journal of natural fibers*, 9:3, 150-167.
- Li, Z., Wang, X., & Wang, L. (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *ELSEVIER Composites Past A 37*, 497-505.
- Merta, I., & Tschegg, E. (2013). Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. *ELSEVIER Construction and Building Materials 40*, 991-997.
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005). Impact strenght of a few natural fibre reinforce cement mortar slabs: a comparative study. *ELSEVIER Cement and concrete composites 27*, 547-553.
- Savastano Jr, H., Warden , P., & Coutts, R. (2005). Microestructure and mechanical properties of waste fibre-cement composites. *ELSEVIER Cement & Concrete Composites 27*, 583-592.

- Savasto Jr., H., Santos, S., Radonjic, M., & Soboyejo, W. (2009). Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. *ELSEVIER Cemento & Concrete Composites* 31, 232-243.
- Yan, L., & Chouw, N. (2013). Compressive and flexural behaviour and theoretical analysis of flax fibre reinforced polymer tube encased coir fibre reinforced concrete. *Materials and design*, 801-811.
- Yan, L., & Chouw, N. (2013). Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column. *Construction and Building Materials* 40, 1118-1127.
- Yan, L., & Chouw, N. (2013). Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column. *Construction and Building Materials* 40, 1118-1127.
- Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (s.f.). Effect of column parameters on flax FRP confined coir fibre reinforced concrete.
- Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites- A review. *Composites: Part B*, 296-317.
- Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites- A review. *Composites: Part B*, 296-317.
- Zhou, X., Hamidreza, S., Dong, W., Olayinka, O., & Fan, M. (2013). Fracture and impact properties of short discrete jute fibre reinforced cementitious composites. *ELSEVIER Materials and Design* 48, 35-47.

Páginas electrónicas

- Fierro de Occidente S.A. de C.V. (2015). Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.ferroccsa.com.mx/images/tablas/VarillaCorrugada.pdf>.
- Financiera Rural. (Agosto de 2011). *Monografía del Henquen y el Sisal*. Recuperado el 25 de noviembre de 2014, de <http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Monografias/Monograf%C3%ADaHenequ%C3%A9nSisal%28ago11%29.pdf>

Normas aplicables

- American Society for Testing and Materials. (2004). *D 3039 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*.
- American Society for Testing and Materials. (2004). *D-790 Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.
- Gobierno del Distrito Federal. (2004). *Normas Técnicas Complementarias*. México, D.F.

ANEXOS

Anexo 1 Ficha Técnica Resina epoxica Epolam 2015



EPOLAM 2015 RESIN EPOLAM 2014 - 2015 – 2016 HARDENERS

LAMINATING EPOXY RESIN
Tg 80 TO 90°C - GELATION TIME 2 hrs 30 TO 8 hrs

APPLICATIONS

- Production of composite structures by wet lay-up methods.
- Vacuum and low pressure injection and by filament winding.
- Good behaviour for wood impregnation.

PROPERTIES

- Low viscosity
- Good mechanical properties
- Good behaviour in moist environment

PHYSICAL PROPERTIES					
		RESIN EPOLAM 2015	HARDENER EPOLAM 2014	HARDENER EPOLAM 2015	HARDENER EPOLAM 2016
Mixing ratio by weight		100	32	32	32
Aspect		liquid	liquid	liquid	liquid
Color		light amber	light amber	colorless	light amber
Brookfield LVT viscosity at 25°C (mPa.s)	-	1,300 – 1,800	60 - 80	60 - 80	25 - 35
Density at 25°C	ISO 1675-85	1.13 – 1.17	0.94 – 0.98	0.93 – 0.97	0.96 – 1.00

Brookfield LVT viscosity at 25°C	-	mPa.s	550 - 750	500 - 600	400 - 500
Specific gravity at 25°C	ISO 2781-88		1.10 – 1.14	1.06 – 1.10	1.12 – 1.16
Pot life at 25°C on 500g	-	min.	50 - 70	125 - 155	360 - 450
Gelation time at 23°C on laminate (5 plies / glass fabric 290 g/m ²)	LT 051-98	hr	2.5	6	8
Demolding time at 23°C on laminate (5 plies / glass fabric 290 g/m ²)	-	hr	18	24	48

PROCESSING

To obtain the desired temperature resistance and the optimal mechanical properties it is necessary to make a post-treatment of EPOLAM 2015 system. The thermal treatment takes place 24 to 48 hours after application according to the hardener. In order to avoid any distortion risks it is recommended to put the part on a frame before curing by plateau values.

Examples of curing: To obtain a Tg above 80°C

- 24 hr 00 at 60°C
- 12 hr 00 at 70°C

To obtain a 90°C Tg (Hardeners EPOLAM 2014 and EPOLAM 2015)

- 24 hr 00 at 80°C

Working at 20°C minimum ensures a very good start of curing of EPOLAM 2015/2016 system.

Page 1/2 - 7085/02357

AXSON TECHNOLOGIES Head Office France +33 1 34 43 34 60 axson@axson.fr axson.fr	GERMANY +49 60 74 40 71 10 axson.de@axson.de axson.de	SPAIN & PORTUGAL +34 93 225 18 20 axson@axson.es axson.es	SLOVAKIA +421 37 842 25 28 info@axson-sk.sk axson-sk.sk	NORTH AMERICA +1 517 863 8191 info@axson-na.com axson-na.com	JAPAN +81 564 26 25 91 info@axson.jp axson.jp	INDIA +91 20 2551071011 info@axson.in axson.com
	ITALY +39 02 96 70 23 36 axson@axson.it axson.it	U.K. +44 1 638 66 00 62 info@axson.co.uk axson.com	MEXICO +52 55 52 64 49 22 axson@axson-mex.com axson.com.mx	CHINA +86 21 58 66 30 97 china@axson.cn axson.cn	MIDDLE EAST +971 439 532 81 info.middleeast@axson.com axson.com	



EPOLAM 2015 RESIN

EPOLAM 2014 - 2015 – 2016 HARDENERS

LAMINATING EPOXY RESIN
T_g 80 TO 90°C - GELATION TIME 2 hrs 30 TO 8 hrs

MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES AT 23°C (1)					
			2014	2015	2016
Glass transition temperature	DSC-Mettler	°C	91	88	81
Flexural modulus of elasticity	ISO 178-93	MPa	3.100	3.000	2.900
Maximal flexural strength	ISO 178-93	MPa	120	120	110
Tensile strength	ISO 527-96	MPa	70	70	73
Elongation at break	ISO 527-96	%	5	6	7
CHARPY shock resistance	ISO 179/D	kJ/m ²	40	55	43
Hardness	ISO 868-85	Shore D15	83	82	84

(1) Average values obtained on standardized specimens of pure resin / Hardening 24 hrs at 23°C + 16 hrs at 80°C.

PRECAUTIONS

Normal health and safety precautions should be observed when handling these products :

- ensure good ventilation
- wear gloves and safety glasses

For further information, please consult the product safety data sheet.

STORAGE

Use within 24 months of the manufacturing date. Expiry date indicated on the packaging.

PACKAGING

Resin EPOLAM 2015	Hardener EPOLAM 2014	Hardener EPOLAM 2015	Hardener EPOLAM 2016
20 kg	6,4 kg	6,4 kg	
220 kg	20 kg	20 kg	20 kg
1.100 kg	200 kg	200 kg	200 kg
	900 kg	900 kg	900 kg

GUARANTEE

The information of our technical data sheet are based on our present knowledge and the result of tests conducted under precise conditions. It is the responsibility of the user to determine the suitability of AXSON products, under their own conditions before commencing with the proposed application. AXSON refuse any guarantee about the compatibility of a product with any particular application. AXSON disclaim all responsibility for damage from any incident which results from the use of these products. The guarantee conditions are regulated by our general sale conditions.

Page 2/2 - 7085/02357

AXSON TECHNOLOGIES Head Office France +33 1 34 40 34 60 axson@axson.fr axson.fr	GERMANY +49 69 74 40 71 10 vco.s.a@axson.de axson.de	SPAIN & PORTUGAL +34 93 225 19 20 axson@axson.es axson.es	SLOVAKIA +421 37 842 25 26 office@axson.sk axson-sk.sk	NORTH AMERICA +1 917 663 8191 info@axson-na.com axson-na.com	JAPAN +81 564 26 25 91 sa@axson.jp axson.jp	INDIA +91 20 2561371/0/11 info.india@axson.com axson.com
	ITALY +39 02 96 70 23 36 axson@axson.it axson.it	U.K. +44 1 638 66 00 62 sa@axson.co.uk axson.com_uk		MEXICO +52 55 52 64 49 22 axson@axson.mx axson.com.mx	CHINA +86 21 58 68 30 37 china@axson.cn axson.cn	MIDDLE EAST +971 433 532 81 info.middleeast@axson.com axson.com

Anexo 2 Las fibras naturales en el concreto

En matrices frágiles, como las de cemento, las fibras se introducen con el objetivo de controlar la apertura de fisuras o evitar su propagación en caso de que estas se presenten. Esto tiene el efecto de incrementar la deformabilidad, aumentar la energía que debe acumular una carga externa para que ocurra una fractura y la resistencia contra el impacto.

Si el refuerzo con fibra es lo suficientemente efectivo la resistencia a la tensión del material aumenta. La resistencia a la tensión de la matriz por si sola es baja, la del cemento portland se encuentra entre el 10% y 12% de la resistencia a la compresión.

La unión entre matriz y fibra también es un elemento decisivo. Esta depende de la calidad y procesos que aparecen en la interface matriz/fibra. La unión entre matriz y fibra se puede asegurar por diferentes procesos: adhesión, anclaje mecánico y fricción, dependiendo de las propiedades químicas y mecánicas de cada fase.

Las fibras se pueden distribuir de forma ordenada o al azar. El volumen de fibras es usualmente limitado por razones tecnológicas debido a que el incremento en contenido de fibra, causaría dificultad o inclusive una imposibilidad en la creación de un compuesto homogéneo. La influencia de las fibras en el comportamiento de los compuestos sujetos a cargas es compleja. En los límites de deformaciones elásticas las fibras no están activas y su comportamiento puede ser derivado de la ley de matrices. Cuando microfisuras se abren las fibras controlan su propagación (Brandt, 2009).

Las fibras dispersas aumentan significativamente la ductilidad sobre estructuras de concreto reforzadas tradicionalmente cuando estas son sometidas a cargas cíclicas debido a un evento sísmico. Incremento en la fuerza de tensión, dispersión de las fisuras y microfisuras y una capacidad mejorada de deformación son importantes características requeridas para el diseño y mejoramiento de edificios en áreas de alta actividad sísmica. Las fibras de acero dispersas, incrementan la ductilidad, absorción de energía, resistencia de corte y rigidez. (Brandt, 2009).

Gracias a las fibras metálicas, la influencia favorable de refuerzo difuso en la disipación de energía durante un impacto ha sido empíricamente probada pero es difícil de cuantificar. Usar concreto reforzado con fibras para aplicaciones particulares donde la absorción de energía es importante. (Mazars & Millard, 2009).

Distribución e integración de las fibras en el concreto

Las fibras cortas en su mayoría se distribuyen al azar, pero alinearlas también es posible. El refuerzo con fibras es por naturaleza sujeto al azar, en contraste al refuerzo convencional como varillas corrugadas.

La estructura que pueden formar las fibras de refuerzo se puede caracterizar por los siguientes parámetros (Brandt, 2009):

- Materiales de las fibras
- Forma de la fibra (cortas o continuas, fibras individuales o tejidos, fibras lisas o rugosas, redes o telas)

- Distribución de las fibras en la matriz (al azar, linear, regular)
- Cantidad de fibras en la matriz (volumen o fracción de masa).

Cuando se utilizan fibras cortas los tres tipos de estructuras ideales son los siguientes (Brandt, 2009):

- Fibras linealizadas (1D)
- Distribución al azar en planos paralelos (2D)
- Distribución al azar en el espacio (3D)

El tamaño del agregado tiene influencia sobre la distribución de las fibras y ese efecto incrementa junto con el tamaño de grano.

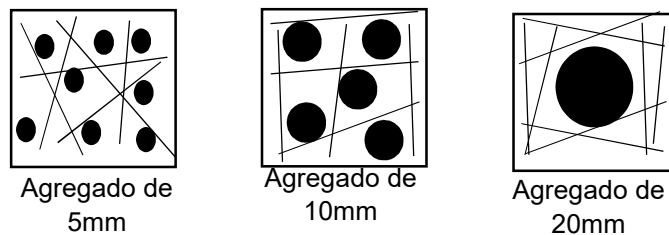


Ilustración 22. Efecto del tamaño del agregado en la estructura y distribución de la fibra en un cuadrado de lados iguales a la longitud de la fibra (40mm) (Brandt, 2009)

No existen resultados confiables publicados sobre la interface entre matriz-fibra, para fibras naturales. En general, las fibras con mayor diámetro y extremos formados requieren más energía para desprenderse de la matriz, pero fibras más pequeñas, debido a su incrementado número en el mismo volumen, pueden exhibir mejor desempeño requiriendo menores valores para la fuerza de unión.

(Li, Wang, & Wang, 2006) Propone 2 métodos de integración o mezclado de las fibras en el concreto.

Húmedo

- El agua requerida para la mezcla se pesa, incluyendo la que será absorbida por la fibra.
- La fibra y el agua se vierten en un contenedor y se revuelven lentamente
- Los agregados gruesos, la arena y el cemento se ponen en una mezcladora por tres minutos.
- El agua con la fibra se agregan lentamente a la mezcladora.
- La mezcla se revuelve por 4 minutos
- La mezcla se detiene 2 minutos, luego se revuelve otros 3 minutos y se vierte en el molde

Seco

- La mitad del agregado se vierte en la mezcladora, se activa la mezcladora y luego la mitad de la fibra se añade
- La mitad restante de agregado grueso se añade a la mezcla
- El resto de la fibra se añade lentamente
- Se añade agua extra para la absorción de la fibra
- Se añade arena a la mezcla y se revuelve 3 minutos
- El cemento se añade a la mezcla junto con la mitad de agua
- La mezcla se revuelve otros tres minutos y se añade el agua faltante
- Se detiene el mezclado 2 minutos
- Se revuelve la mezcla otros tres minutos y se vierte en el molde

Estudios realizados sobre las fibras naturales en el concreto

(Ramakrishna & Sundararajan, 2005) En este estudio se investiga la resistencia al impacto de bloques de cemento reforzados con fibras naturales como coco, henequén, yute, cáñamo. Se utilizaron cinco diferentes contenidos de fibra (0.5%, 1.0% 1.5%, 2.5% por peso de cemento) y tres longitudes de fibra (20mm, 30mm y 40mm). Con la inclusión de dichas fibras se mejoró la resistencia al impacto de los bloques de 3 a 18 veces. De todas las fibras mencionadas la de coco fue la que tuvo mejor rendimiento (en un contenido del 2% y con una longitud de fibra de 40mm) en los indicadores medidos que fueron, resistencia al impacto, relación de resistencia al impacto residual, resistencia a la fisura por impacto y la condición de la fibra bajo fallas. Además, los especímenes con fibra de coco, cuando se fracturaron, las fibras sufrieron de desprendimiento de la matriz y no de rompimiento como ocurrió con todas las demás fibras.

(Li, Wang, & Wang, 2006) Estudiaron las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra de cáñamo. Las variables investigadas fueron: 1 método de mezclado, 2 contenidos de fibra por peso, 3 tamaños del agregado y 4 longitudes de la fibra. Llegaron a la conclusión que la resistencia a la compresión de este tipo de compuestos es menor que la del concreto regular. Se escogió la fibra de cáñamo por su resistencia al ambiente alcalino del cemento. Encontraron también que el método de mezclado húmedo tiene una influencia positiva en las propiedades de flexión del compuesto (resistencia a la flexión, dureza e índice de dureza). Y el factor principal que afecta las propiedades de flexión y compresión de los compuestos es la cantidad de fibras por peso. En el proceso de mezclado húmedo la resistencia a la compresión incrementa con agregado grueso más pequeño, menor longitud y contenido de fibra.

(Zhou, Hamidreza, Dong, Olayinka, & Fan, 2013) Realizaron estudios sobre las propiedades de fractura e impacto de compuestos de cemento reforzados con fibras cortas de yute (20mm) Encontraron que aquellos elementos con matriz de cemento portland mezclado con escoria granulada de altos hornos (EGAH), mejoran la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y dureza de fractura. Y las matrices de cemento con ceniza volante mejoran la capacidad de absorción de energía y la resistencia al impacto. Todas estas propiedades se reducían con el paso de los días. Se utilizó el método de mezclado húmedo. Las fibras sufrieron menos deterioro en la matriz de cemento portland con ceniza volante. El desprendimiento de fibra se notó en las matrices de ceniza volante mientras que se observó fractura de fibra en las matrices de escoria.

Zhoue, en su investigación hace referencia a otro estudio donde se descubrió que la resistencia a la compresión del concreto se redujo con la adición de fibras de henequén, se cree que esto se debe que es a su baja trabajabilidad y que la microestructura del concreto no se vuelve tan densa como cuando no se le incluyen estas fibras.

(Savasto Jr., Santos, Radonjic, & Soboyejo, 2009) Estudio el comportamiento de fatiga y fractura de compuestos cementosos. Se utiliza escoria de horno granulada, y para las fibras se utilizan subproductos de la agricultura, que son: eucalipto, henequén y banana. Se reduce el contenido de lignina de las fibras, que ha sido demostrado que ayuda a su durabilidad en ambientes alcalinos. El método fue el despulpado kraft. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran, que los compuestos con matriz de cemento portland con EGAH reforzado con fibras despulpadas, muestran una mayor tenacidad a la fractura que el la pasta de cemento. Los compuestos más estables fueron aquellos reforzados con henequén y banana.

(Savastano Jr, Warden , & Coutts, 2005) En esta investigación se estudió la microestructura y propiedades mecánicas de compuestos cementosos reforzados con fibra proveniente de desperdicio. Se utilizó fibra de desperdicio de sisal, banana y eucalipto, además se probaron fibras comerciales de sisal y pino de california. Se probaron matrices de escoria de altos hornos granulada combinada con cemento portland, y de cemento portland solo. Las fibras de desperdicio de sisal y eucalipto presentaron unión satisfactoria con ambas matrices. En las pruebas de flexión los mejores resultados los obtuvo la fibra pinos radita. Observaron desunión parcial y fisurado de la matriz apareciendo en áreas de interface, lo que se acepta como una situación deseable para la disipación de energía.

(Merta & Tschegg, 2013) En su investigación probaron la energía de fractura de concreto reforzado con fibras de cáñamo, pasto elefante y paja de trigo. Se agregó fibra al 0.19% de peso, con una longitud de 40mm, al concreto. Se encontró que la adición de las fibras mejoro la tenacidad de fractura. Los mejores resultados se obtuvieron con la fibra de cáñamo, la cual mejoro la energía de fractura del concreto en un 70%, mientras que con la fibra de pasto y la de paja se mejoró solo en un 2% y 5% respectivamente.

(Alvarado Juarez & Rodriguez Lopez, 2004) En su investigación estudiaron la viabilidad del uso de la fibra de lechuguilla en el concreto. Las variables fueron: longitud de fibra 20-30mm, en una cantidad del 1% del volumen de la mezcla, tratamiento (con aceite de linaza, aceite de linaza + resina natural, parafina, parafina + resina natural, selladora para madera, creosetosa), matriz de cemento en relación de agua 1:0.5 y 1-0.35. Un dato importante que menciona esta investigación y que se debe tener en cuenta es que al saturarse, las fibras absorben una cantidad de agua casi el 100% de su peso seco. El tratamiento con parafina, en una matriz de relación agua cemento 1-0.35, proporciono mejor comportamiento a la flexión y un mayor módulo de ruptura. También, las fibras largar en baja cantidad, proporcionan al concreto la capacidad para soportar mayores cargas de flexión en comparación con el concreto simple.