



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

CUBIERTAS TENSADAS A PARTIR DE FIBRAS NATURALES

TESIS

Que para optar por el grado de Maestra en Arquitectura

Presenta:

María Fernanda Guerrero Ureta

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Muciño Vélez

Facultad de Arquitectura
Programa de maestría y doctorado en arquitectura

COMITÉ TUTOR:

Mtra. Perla Rafael Santa Ana Lozada

Facultad de Arquitectura
Programa de maestría y doctorado en arquitectura

Mtro. Jorge Rangel Dávalos

Programa de maestría y doctorado en Arquitectura

Mtra. Tamara León Camacho

Facultad de Arquitectura

Mtra. Alma Rosa Ortega Mendoza

Facultad de Arquitectura

México D.F. Noviembre de 2015



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.

"La originalidad consiste en el retorno al origen; así pues, original es aquello que vuelve a la simplicidad de las primeras soluciones."

Antonio Gaudí

AGRADECIMIENTOS

A las personas que me han dado su amor y apoyo incondicional en todo momento, por formar parte en el logro de mis sueños, por motivarme a ser mejor cada día, son mi luz, mi guía y mi inspiración para salir adelante.

Mamá y papá

A mis hermanos, por ser mis distractores en la rutina, por simplificar mi vida, por ser cómplices y por hacerme reír incontables veces.

A mis abuelos, por la formación que me han dado, por los consejos y todos los momentos que he pasado a su lado, siempre los llevo conmigo.

A Fernando, por ser mi compañero y estar siempre a mi lado, por darme fuerzas y transmitirme tu energía cuando lo necesito, por tu protección y paciencia, te agradezco cada experiencia vivida.

A mis amigos, por estar siempre, algunos a pesar de la distancia, por todo su apoyo.

A mis sinodales, en especial a mi tutor por guiarme y hacer posible el desarrollo de esta investigación, por su tiempo y dedicación.

Por último, a la UNAM por abrirme sus puertas y permitirme realizar otro de mis sueños y a CONACYT por los recursos brindados.

INDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

1.1 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CUBIERTAS A TENSIÓN	1
1.1.1 Tiendas tipis	2
1.1.2 Cubiertas romanas	4
1.1.3 Arquitectura beduina	4
1.1.4 Evolución de los sistemas tensados	5
1.2 TIPOS DE ESTRUCTURAS A TENSIÓN	7
1.2.1 Estructura neumática	8
1.2.1.1 Materiales empleados en estructuras neumáticas	8
1.2.1.2 Características de las estructuras neumáticas	9
1.2.1.3 Tipos de estructuras neumáticas	9
1.2.2 Tensegrity	10
1.2.2.1 Características del tensegrity	11
1.2.3 Membranas tensionadas	12
1.2.3.1 Tipos de membranas tensionadas	13
1.2.3.2 Elementos de una membrana tensionada	16
1.2.3.3 Redes de cuerdas	21
1.2.3.4 Detalles constructivos	22
1.2.3.5 Requerimientos estructurales	25
1.2.3.6 Geometría	26
1.2.3.7 Características de un sistema tensado	26
1.2.3.7.1 Luminosidad	27
1.2.3.7.2 Factores climáticos	28

1.2.3.7.3 Aislamiento acústico	29
1.2.3.7.4 Aislamiento térmico	30
1.2.3.7.5 Comportamiento estructural	31
1.3 TENSOESTRUCTURAS INSPIRADAS EN LA NATURALEZA	35
1.4 EJEMPLOS DE TENSOESTRUCTURAS	41
1.4.1 Cubiertas textiles japonesas	41
1.4.2 Star	42
1.4.3 Cubierta del estadio olímpico de Munich	43
1.4.4 Proyecto de cubierta para el castillo ferrara	44

CAPITULO II

2.1 EL ORIGEN DE LAS FIBRAS	47
2.2 FIBRAS SINTETICAS	49
2.2.1 Textiles sintéticos	51
2.3 FIBRAS NATURALES	53
2.3.1 Impacto ambiental del uso de las fibras naturales en la construcción	54
2.3.2 Tipos de fibras naturales	56
2.3.2.1 Fibra de coco	56
2.3.2.2 Caña de azúcar	59
2.3.2.3 El cáñamo	61
2.3.2.4 Fibra de henequén	65
2.3.3 Propiedades físicas y mecánicas de las fibras de henequén	67
2.3.4 Puente con fibras naturales	73
2.3.5 Producción de las fibras naturales	75
2.4 TIPOS DE TEJIDO	76
2.4.1 Crochet	76
2.4.2 Telas orbiculares	78
2.4.2.1 Uso de la geometría de la tela de araña	80

2.4.3 Tejido de punto	83
2.4.4 Diferencia entre tejido y membrana.....	84
2.5 FIBRAS COMO MATERIAL DE REFUERZO.....	85
2.5.1 Biocomposites.....	87
2.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS NATURALES	89

CAPITULO III

3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	90
3.1.1 Conceptos básicos de las propiedades mecánicas	91
3.1.2 Prueba a tensión	95
3.1.3 Esfuerzo-Deformación ingenieril.....	97
3.1.4 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.....	99
3.2 METODO DE PRUEBA ASTM D3822	100

CAPITULO IV

4.1 ANÁLISIS DE LAS FIBRAS Y GEOMETRÍA A EMPLEAR	105
4.2 EQUIPO DE MEDICIÓN.....	108
4.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	110
4.4 ELECCIÓN DE LA GEOMETRIA A EMPLEAR	111
4.4.1 Paraboloides hiperbólico	111
4.4.2 Arco	112
4.4.3 Conoide.....	113
4.5 MODELOS DE MEMBRANA	114
4.6 ELABORACIÓN DE SINTETICO CON FIBRAS NATURALES.....	123
4.7 CONFORMACIÓN DE PROBETAS	125
4.8 CONSIDERACIONES PARA LA PRUEBA A TENSIÓN	128

4.8.1 Realización de la prueba	128
4.9 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES	132
4.9.1 Relación de variables a experimentar.....	133
4.9.2 Función de la relación entre variables	134
4.10 RESULTADOS	136

CONCLUSIONES

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

REFERENCIAS

RESUMEN

El empleo desmedido de los materiales de construcción utilizados en la actualidad ha generado un alto índice de contaminación al no plantear soluciones medioambientales al término de su vida útil.

En el caso de los sistemas tensados, estos se componen de materiales plásticos y de acero, la problemática inicia ya que no son biodegradables y se requiere de una gran cantidad de energía para su fabricación. En el presente estudio se analizan las fibras naturales sometiéndolas a pruebas a tensión para determinar su resistencia y compararla con el acero y los materiales utilizados por la industria fabricante de cubiertas, además se realizan algunas propuestas de tejidos entramados para idealizar un prototipo de membrana que pudiera emplearse en el desarrollo de una cubierta tensada.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación surge a partir de la preocupación por el empleo desmedido de los materiales de construcción que resultan contaminantes en gran parte del planeta, estos materiales a pesar de que han resuelto las necesidades básicas de los usuarios, no benefician ni plantean una solución en cuanto a los aspectos medioambientales.

Los sistemas tensados han existido desde nuestros inicios, presentan una alternativa viable de solución debido a su eficiencia energética y adaptabilidad a distintos medios. La problemática inicia ya que generalmente los cables utilizados en estos sistemas están compuestos por hilos de acero, los cuales no han resultado del todo eficientes puesto que presentan un creciente deterioro en ambientes húmedos, pesadez y en su fabricación requieren de una gran cantidad de energía durante su elaboración. Por otra parte las lonas utilizadas en dichos sistemas están compuestas por plásticos provenientes del petróleo, que de igual forma, son altamente contaminantes al no propiciar un reciclaje al concluir su vida útil.

La industria de la construcción es altamente contaminante debido a los materiales que se emplean y los grandes desperdicios, se torna viable imitar los procesos y diseños de la naturaleza como lo dicta la biomimesis, una corriente joven que apuesta por proponer nuevos materiales basándose en la observación y el estudio del medio que nos rodea.

En este estudio se ha hecho un análisis sobre las estructuras tensadas para proponer, elementos, materiales, requerimientos estructurales, de diseño y geometrías; estableciendo el paraboloides hiperbólico como la más óptima y adaptable en espacios abiertos.

Por otra parte, se han analizado las propiedades físicas de cuatro fibras naturales: fibra de cáñamo, fibra del bagazo de caña de azúcar, fibra de coco y fibra de henequén, por ser fibras que han sido utilizadas en materiales compuestos para fines constructivos e industriales.

Basándose en ello, la fibra de henequén y la fibra de coco, han resultado en investigaciones anteriores tener un buen comportamiento mecánico y además de ser producidas en México.

El cultivo de henequén ha disminuido su venta en México en los últimos años y la fibra de coco es desechada en su mayor parte por la industria alimenticia. El empleo de estas fibras aumentaría su producción, la economía y se aprovecharía el uso de las fibras de coco.

El objetivo principal de esta investigación es emplear fibras naturales en cubiertas ligeras como un elemento que refuerce la geometría y estructura de éstas. Se pretende efectuar pruebas a tensión de la fibra de henequén y de coco, así como el caucho de silicón con fibras naturales para observar las propiedades que se obtienen, como el módulo elástico y resistencia a tensión, entre otros.

La aportación que se pretende, se basa en la posibilidad de construir cubiertas ligeras con un material amigable al medio natural y que exista una integración física con el entorno, pudiéndose adaptar a diversos patrones culturales.

CAPITULO I

1.1 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CUBIERTAS A TENSIÓN

Las tensoestructuras son eficientes sistemas estructurales que aparecieron a mediados del siglo XX, dichos sistemas están basados en la utilización de membranas estructurales.

Una membrana estructural está conformada por postes, cables y textiles que actúan a tensión y pueden tener una vasta variedad de diseños y ser utilizadas como cubiertas o revestimientos en edificios, tales como estadios, jardines, plazas etc.

Una tensoestructura presenta una buena solución alternativa debido a su eficiencia energética y su adaptabilidad, sus principales características son:

- Coberturas eficientes y ligeras a partir de materiales de mínimo peso y masa
- Superficies con materiales traslucidos que favorecen una iluminación natural
- Aislamiento acústico y ambiental que mejora el confort del usuario sin necesidad de equipos de aire acondicionado
- Implementación de materiales reciclables
- Posibilidad de integración formal con los diversos patrones culturales¹

En cuanto a su eficiencia estructural, las tensoestructuras optimizan y reducen al límite la cantidad de material constructivo empleado, ya que son resistentes a los impactos naturales, por ejemplo su fortaleza al colapso frente a un sismo y por último mantienen un bajo peso específico.

¹ Alberto Marroquín, Tensoestructuras, *Revista digital apuntes de arquitectura* Volumen 32, Octubre 2012, http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.mx/2011_10_01_archive.html (Fecha de consulta: 03 de Febrero de 2014)

Los sistemas tensados se han empleado desde nuestros inicios, tal es el ejemplo de los restos encontrados hace 4000 años en lo que hoy es conocido como Ucrania, ellos emplearon huesos de mamut y pieles de animales que confeccionaban de modo rudimentario para poder protegerse del clima y de otras agresiones externas.

1.1.1 LAS TIENDAS TIPIS

La palabra "tipi" proviene del término Lakota, que significa "lugar para vivir" el tipi era una estructura de forma cónica cubierta de tela, la cual era utilizada por los indios de las llanuras centrales de Norteamérica y funcionaba como un hábitat para acampar.

Su forma de cono asimétrico propiciaba un espacio en cuyo centro el fuego ayudaba a las tareas cotidianas. Una abertura en la cúpula de la tienda (que podía ser abierta o cerrada a voluntad de sus inquilinos mediante dos varas exteriores) extraía el humo de la hoguera, regulaba la luz, protegía de la lluvia y mantenía renovado el aire.²



Figura 1: Envoltente de una tienda tipi ³

La envoltente del tipi (Figura 1) antiguamente estaba hecha de piel de búfalo tratada (en la actualidad es de algodón impermeabilizado) y servía para cubrir el armazón de palos que hacen la forma cónica, los palos debían

² Albert Txema, *Tipis*, <http://www.inoxidables.net/nacionesindias/tipi.htm> (Fecha de consulta: 22 de febrero de 2014)

³ Los verdaderos americanos, <http://vidasanatuvida.files.wordpress.com/2013/03/tienda-tipi.jpg> (Fecha de consulta: febrero de 2014)

de estar pulidos para evitar cualquier rasgadura, los tipis podían llegar a medir desde 2 metros de diámetro hasta 12 metros, pero regularmente eran de 4 o 5 metros.

Los tipi se siguen utilizando en la actualidad ya sea para acampar en lugares remotos o para estar en contacto con la naturaleza, actualmente su fabricación consta de:

- Palos
- Cubierta
- Lona interior
- Accesorios de lluvia

En la figura 2 se observa la estructuración de una de estas tiendas.

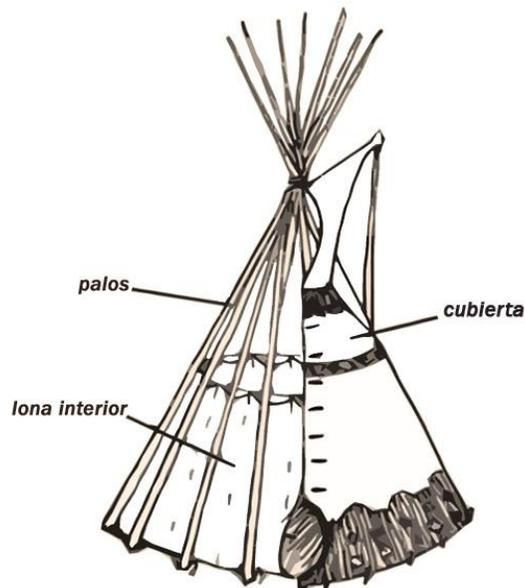


Figura 2: Estructura interior y exterior de una tienda tipi⁴

⁴ Tipiwakan, <http://www.tipis.es/nuestras-estructuras/tipis/partes-y-materiales/> (31 de Octubre de 2014)

1.1.2 CUBIERTAS ROMANAS

El coliseo romano contaba con una cubierta de tela desplegable que se accionaba por medio de poleas (Figura 3). Al principio, ésta cubierta estaba hecha con tela de vela y después fue sustituida por lino debido a su ligereza y se apoyaba por medio de un entramado de cuerdas, cada sector de tela podía moverse por separado de los alrededores y era accionada manualmente.

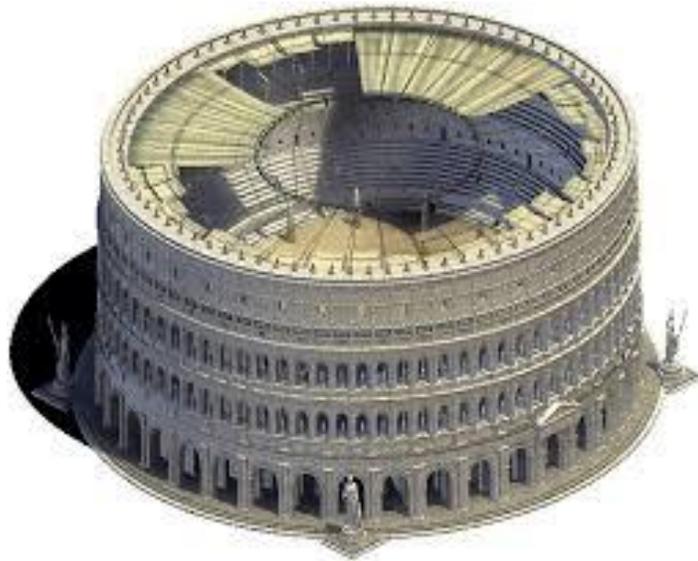


Figura 3: Antigua cubierta del coliseo romano⁵

1.1.3 ARQUITECTURA BEDUÍNA

La palabra “beduino” se deriva de la palabra árabe “bedu” que significa nómada. Gran parte de los beduinos viven en tiendas humildes y son caracterizadas por su forma rectangular y las van montando y desmontando según las estaciones de lluvia y sequía.

⁵ Historia del arte, <http://verdadyverdades.blogspot.mx/2010/10/el-coliseo-o-anfiteatro-de-favio.html> (Consultado el 2 de febrero de 2014)

La estructura se compone de mástiles de madera, tensores de cuerda y grandes piedras pesadas que funcionan como cimentación como se observa en la figura 4. El recubrimiento de la carpa se compone a base de pelo de camello o de cabra.⁷



Figura 4: Tienda beduina típica⁶

1.1.4 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS TENSADOS

La eficiencia estructural de los sistemas tensados estaba resuelta desde hace mucho tiempo, ejemplo de esto son los puentes colgantes construidos por los incas, los cuales cubrían claros entre 60 y 100 mts. y eran utilizados para cruzar abismos y ríos. Ellos fabricaban los puentes tejiendo fibras vegetales que conformaban sogas de distintos diámetros.

Se considera que la arquitectura textil contemporánea comenzó después de la segunda guerra mundial. En 1952 se construyó el Raileigh Livestock Arena, en Carolina del Norte, E.U.A. El edificio está compuesto por un par de arcos cruzados que forman 20° sobre la horizontal, los arcos están separados por una distancia de 95 metros y están cubiertos mediante cables tensados que se entrecruzan entre sí formando una superficie con doble curvatura en su interior.⁸

⁶ Tienda beduina en el desierto de Sahara, Marruecos África, <http://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-tienda-beduina-en-el-desierto-de-s%C3%A1hara-image7533320> (Consultado el 30 de octubre de 2014)

⁷ Alejandro Bahamon, *Arquitectura textil: transformar el espacio*, (Barcelona España: Instituto morisa de ediciones, S.A., 2004)

⁸ Javier Sánchez Sierra, "Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real", (Tesis de doctorado publicada, Universidad de Navarra, escuela superior de ingenieros, San Sebastián, España, 2006)

Posterior a esta construcción se incrementó el uso de formas orgánicas, principalmente en exposiciones, puesto que servían como prueba para llevar a la práctica construcciones con mayor variedad de formas y técnicas.

En la década de los 50's Frei Otto fue el principal precursor de las tensoestructuras, su éxito se basó en un estudio sistemático de las formas de la naturaleza partiendo de la experimentación con burbujas de jabón, las cuales adoptaban la forma según la cual tendrá la superficie mínima, concepto que era de gran interés para el arquitecto.

En general, los ensayos consistían en sumergir el marco en agua jabonosa y al retirarlo la burbuja tomaría la forma que implicara menor superficie, Otto concluyó que los modelos basados en la naturaleza permiten obtener automáticamente esfuerzos mínimos y uniformes.

Aprovechando su especialización en las tensoestructuras, Otto realizó algunos trabajos importantes aprovechando las propiedades a tensión de algunos materiales, especialmente el acero, pero también poliuretano, poliéster, PVC, fibra de vidrio, mezcla de poliéster y algodón, paneles acrílicos, entre otros.⁹

En colaboración con Ted Happold,¹⁰ Otto inició otro experimento que consistía en desarrollar mallas de acero basándose en la geometría de las telas de araña; ambos estaban especialmente interesados en la realización de maquetas para así observar el comportamiento que tenían los materiales y la estructura. Consideraban que no existía otro método, más que éste, para estudiar y desarrollar obras, y conforme a los resultados que obtuvieron con las maquetas se decía que eran un éxito.

⁹ Tessore Becerra Lomonaco, "Frei Otto", http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/fceia.monografia.frei_otto_2.pdf (Fecha de consulta: 23 de febrero de 2014)

¹⁰ Ted Happold: Ingeniero de estructuras y fundador del Buro Happold (http://en.wikipedia.org/wiki/Edmund_Happold)

1.2 TIPOS DE ESTRUCTURAS A TENSIÓN

Actualmente existen 3 tipos de estructuras a tensión que son las que se utilizan comúnmente en arquitectura:

- **Red de cables para techos o recintos:**

Esta red estructural de doble curvatura se mantiene en tensión para evitar que se desprenda bajo la carga de los vientos. Dicho sistema puede llevar una capa separada no estructural de hojas o paneles para dar protección contra el clima.

- **Tela para techos o recintos:**

Siguiendo el mismo principio de las redes de cable, la membrana flexible es de doble curvatura y se mantiene a tensión para evitar que se desprenda, la diferencia con la red de cables es que en este caso la membrana flexible actúa como estructura y como protección contra el clima.

- **Estructuras apoyadas por aire:**

Una membrana flexible que realiza doblemente la función de estructura y como protectora contra el clima, pero en este caso la membrana es estabilizada contra el desprendimiento por la presión de aire y no por la curvatura; existen dos variantes: la totalidad del interior puede ser presurizada para sostener el techo o una serie de tubos de tela pueden ser presurizados para actuar como costillas estructurales.

De acuerdo a esto, se define una estructura a tensión como aquella en las que los elementos principales cargan solamente a tensión, sin necesidad de resistir la compresión o fuerzas de flexión.¹¹

¹¹ James Harris, *Masted structures in architecture*, (Londres: Butterworth architecture, 1996)

Las tensoestructuras agrupan los siguientes sistemas:

1. Estructuras neumáticas
2. Tensegritis
3. Membranas tensionadas

El denominador común radica en el esfuerzo de tensión como estrategia principal para la configuración de la estructura, dichos sistemas están compuestos de:

- Geometría de doble curvatura en la superficie
- Sistemas de tensión de cables
- Presión de gases en la membrana

1.2.1 ESTRUCTURA NEUMÁTICA:

Es un sistema constructivo de muy bajo peso basado en la estabilidad de la estructura a partir de las diferencias de presión de aire generada entre el interior de una membrana y el entorno exterior. Este efecto produce una tensión en la superficie de la delgada membrana que le proporciona rigidez y firmeza.

Una estructura neumática está compuesta de:

- Una envoltura inflable
- Un sistema de anclaje perimetral
- Un sistema de provisión de aire
- Un sistema controlado de accesos

1.2.1.1 MATERIALES EMPLEADOS EN ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

A. Películas plásticas:

- Polietileno
- Poliéster
- Policimida
- Cauchos sintéticos

B. Tejidos:

- Fibra de vidrio o sintético
- Revestimientos en PVC, poliéster o poliuretano

C. Membranas de caucho

D. Láminas de metal¹²

1.2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

- Las estructuras neumáticas están compuestas por una sola membrana rigidizada por el volumen de aire interno que conforma el espacio arquitectónico sometido a una sobrepresión de valor muy bajo. Permiten cubrir grandes claros.
- Presentan formas geométricas esféricas o cilíndricas, se componen de aberturas para el control del volumen interno del aire y equipos sopladores para mantener una presión constante.

1.2.1.3 TIPOS DE ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

- Estructuras soportadas por aire:
Son estructuras formadas por una única membrana tensada por una pequeña presión interna diferencial que puede ser positiva, adoptando entonces formas convexas, o negativa, con formas cóncavas.

¹² Robert Le Ricolais, "Estructuras neumáticas", 2011, http://e3enlinea.files.wordpress.com/2011/09/clase_de_neumaticas.pdf (Fecha de consulta: 13 de marzo de 2014)

- Estructuras con aire a presión:
Son estructuras formadas por elementos tipo tubo sometidas a presión superior, que forman pilares, vigas, pórticos, etc. El volumen de aire del local permanece a la presión atmosférica.

1.2.2 TENSEGRITY

La palabra tensegrity es una conjunción de las palabras Tensional Integrity (Integridad de tensiones). Un tensegrity es conocido como una malla espacial de cables que son rigidizados por elementos aislados expuestos a compresión. Es un principio estructural que se basa en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal forma que los miembros comprimidos (generalmente barras) no se tocan entre si y están unidos únicamente por medio de componentes tensados (cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema.

R. Conelly y A. Black¹³ en su libro “Mathematics and tensegrity” hacen una comparativa sobre la forma en la que trabajan en el rango elástico las telarañas (redes de cables) y los tensegrities, y como responden a las deformaciones; Ellos plantearon que “la energía requerida para deformar cada cable es proporcional al cuadro de longitud total de cables”

Conelly y Black califican como “súper estable” el trabajo estructural de los tensegrities, tomando en cuenta que la red exterior de los tensegrities cuenta con los mismos esfuerzos y se deforma igual que las telas de araña, la única

¹³ Robert Conelly, es profesor de matemáticas de la universidad de Cornell, investigador especializado en geometría y rigidez de las estructuras.

diferencia entre las telas de araña y los tensegrities es que estos últimos trabajan con elementos a compresión.¹⁴

1.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TENSEGRITY

- Están en equilibrio y son estables por sí mismos, se dice que están en equilibrio estable ya que el sistema puede recuperar su posición original después de que alguna acción externa lo haya alejado de ella. Dicho equilibrio es independiente de cualquier condición ajena al mismo, no depende de fuerzas externas, ni de la gravedad o anclajes, esto debido a su pretensado inicial.
- Componentes: el término se opone al de “elemento” utilizado en otras definiciones, porque aunque se trate de una barra o un cable, también puede hacer referencia a una membrana, un volumen de aire, un átomo o un ensamblaje de componentes más elementales.
- Compresión o tensión: la clave está en que cada componente en su totalidad, trabaja a compresión o tensión y no las dos al mismo tiempo o de forma mixta.
- En lugar de emplear la estrategia “peso y empuje” están ideadas con un sistema de tensiones equilibradas omnidireccionales, es decir que no necesitan estar apoyadas en algún lugar debido a que están pretensadas y disfrutan de un equilibrio interno propio; al no depender de la gravedad, la tensión generada por atracción terrestre es reemplazada por las tensiones multidireccionales de cada uno de sus miembros.
- Los tensegrity destacan por su ligereza comparándolos con otras estructuras de resistencia similar.
- No existen elementos redundantes, puesto que cualquier nuevo tendón añadido le proporciona mayor rigidez a la estructura.

¹⁴ Juan Manuel Hoyos Mora, *Las estructuras tensegrity*, (Colombia: colección punto aparte, 2009)

- La rigidez de la estructura depende de los materiales empleados y de su modo de ensamblarlos y pueden resultar en función de ellos, muy flexibles y maleables o de gran rigidez y firmeza¹⁵

1.2.3 MEMBRANAS TENSIONADAS

Este sistema funciona por la estabilidad que presenta la estructura a partir de la canalización de esfuerzos por medio de la superficie de la membrana. Los elementos rígidos que trabajan a compresión (postes, arcos y puntales) se unifican con los elementos flexibles que trabajan a tensión (cables y membranas) constituyéndose de esta manera en una eficiente unidad estructural.

La membrana tiene un papel relevante en el conjunto, los materiales empleados en ella deben de estar certificados para poder resistir esfuerzos a tensión muy elevados como son las propiedades antinflama, la radiación ultravioleta, propagación de hongos y polución ambiental.

Una tensoestructura recomienda y exige por normativa algunas características de seguridad, principalmente:

- Las propiedades antinflama: Es decir, propiedades que le proporcionaran características ignifugas al material.
- Longevidad y durabilidad en óptimas condiciones: Es la duración de vida determinada que se le dará a los elementos que conformen la cubierta, para ello se deberá considerar la calidad y un estimado de la durabilidad del material propuesto.
- Resistencia al rasgado: Se refiere a la fuerza que presenta la cubierta hacia agentes externos, ya sea naturales o químicos que puedan deteriorarla y romperla.

¹⁵ Valentín Gómez Jauregui, *Estructuras tensegríticas: Ingeniería y arquitectura novedosas*, (Madrid, España: Servicio publicaciones CEDEX, 2008)

- Ausencia de deformación y estabilidad dimensional: Al estar tensionada de forma permanente, la cubierta podría sufrir deformaciones a largo plazo, es necesario comprobar su estabilidad en un tiempo determinado.
- Resistencia a los rayos ultravioleta: La radiación solar, como le sucede a todos los materiales en tensoestructuras, deteriora poco a poco una cubierta, es prescindible que la cubierta sea resistente a temperaturas extremas a las que pudiera estar expuesta.
- Tratamiento de la superficie contra la aparición de hongos: Es la patología que caracteriza al material, se contempla que no atraiga bacterias u hongos que pudieran afectar la estabilidad de la cubierta.
- En membranas de PVC o fibra de vidrio, se recomienda recubrimiento con capas acrílicas, compuestos fluorados o teflón para mantenimiento simplificado de la suciedad y el polvo.

Para lograr esto, las membranas actuales están fabricadas con varias capas de distintos materiales para cubrir los estándares de seguridad.

1.2.3.1 TIPOS DE MEMBRANAS TENSIONADAS:

- **Cubiertas planas:**

Son cubiertas sensiblemente horizontales, compuestas por uno o varios faldones de pendiente inferior al 5%.



Figura 5: Cubierta tensada para el centro Comercial Bonaire en Valencia.¹⁶

En la figura 5 se observa una estructura tensada sujeta a la estructura de la fachada del edificio y al centro se sujeta de un mástil, la membrana es de poliéster y está conformada por triángulos con una serie de refuerzos en medio de cada sección.

- **Cubiertas curvas con superficie cónica:**

Puede ser simple o múltiple (conjunto de conos) el borde cercano a la base del cono se fija a la membrana y los ejes catenarios ascienden hacia la cima. Los puntos de soporte de los mástiles pueden estar abajo, a nivel o por encima de la membrana estructural.

En este tipo de cubiertas se acentúa el centro o el eje del espacio, como se observa en la figura 6.

¹⁶ Lonas tensadas, <http://carpatec.es/blog/lonas-tensadas/> (Fecha de consulta: 01 de noviembre de 2014)



Figura 6: Tensegrity con geometría cónica¹⁷

- **Velarías:**

Se define una velaría como una tensegrity con una superficie delgada y flexible que soporta las cargas únicamente a través del desarrollo de esfuerzos de tensión.¹⁸

Las velarías permiten muchas posibilidades en su forma y aplicación, pueden adaptarse en espacios ya construidos o por construir. (Figura 7)



Figura 7: Tipología de una cubierta velaría¹⁹

¹⁷ Fabric architecture, <http://www.archiexpo.es/prod/fabric-architecture/tensegrity-cables-membranas-tejados-61155-1044765.html> (Fecha de consulta: 04 de noviembre de 2014)

¹⁸ Fernando Pérez Valadez, Facultad de estudios superiores Acatlán UNAM "Cubiertas velarías: las tensegrity" <http://www.aapaunam.mx/Revista/REV-A5-VOL5-Jul-Sept/Cubiertas-Velarias-Tenso-Estructuras-Rev-Jul-Sept-2013.pdf> (Fecha de consulta: 04 de noviembre de 2014)

¹⁹ Sistemas estructurales <http://sistemasestructuralesii.blogspot.mx/2011/05/lonas-y-velarias.html> (Fecha de consulta: 04 de noviembre de 2014)

1.2.3.2 ELEMENTOS DE UNA MEMBRANA TENSIONADA

Construcciones tensadas:

Una membrana puede implementar tirantes de forma puntual a lo largo del perímetro trabajando conjuntamente con cables y mástiles, para mejorar el aislamiento térmico se le colocan varias capas al material; el claro máximo entre sujeciones es cerca de los 100 metros.

Una membrana tensionada se compone principalmente de los siguientes elementos:

- **Cables:**

Un cable de acero se compone de un conjunto de alambres torcidos que constituyen una cuerda de metal apta para resistir esfuerzos a tensión con cualidades apropiadas de flexibilidad.

Los componentes básicos en el diseño de un cable de acero (Figura 8) son:

-Alambres: Es el componente básico del cable de acero, el cual se fabrica en diversas calidades, según el uso al que se destine el cable final.

-Torón: Se conforma por un número de alambres de acuerdo a su construcción, los cuales son enrollados helicoidalmente alrededor de un centro en una o varias capas.

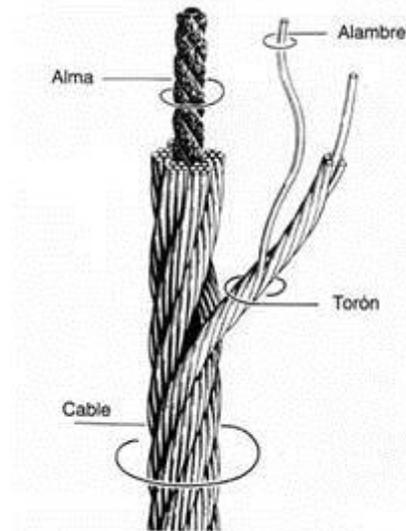


Figura 8: Componentes de un cable de acero

-El alma: es el eje central del cable en donde se enrollan los torones, el alma se puede fabricar de acero, fibra natural o polipropileno, su propósito es servir como base del cable procurando conservar su redondez y soportar la presión de los torones.

Las estructuras conformadas por cables tienen la ventaja de cubrir grandes claros con ligereza y sin la necesidad de soportes intermedios. Generalmente los elementos constructivos son pilones y cables de acero y rejillas de madera o acero, como recubrimiento puede utilizarse vidrio acrílico o láminas translúcidas reforzadas con materiales sintéticos.

Cuando se requiere un cable preferentemente flexible, se debe de elegir uno con alambres externos, lo más fino posible y al revés si se desea un cable más rígido, pero se debe tener en cuenta que cuanto más finos son los alambres externos, tendrá menor resistencia a la abrasión.

En el perímetro de estas construcciones (en los aleros, etc.) se fijan cables en forma de guirnalda que generalmente se anclan a pilares inclinados de acero. Los que son llamados “pilares aire” son elementos portantes que a su vez están atirantados, subdividen el cable principal para disminuir la sección.

Existen muchas conformaciones de cables alternando y combinando iguales o distintos grosores de alambres, rellenando los espacios libres dentro del cable entre alambre y alambre, obteniendo mejores resultados al desgaste por fricción interna y fatiga y/o al rozamiento externo colocando los más gruesos por ese lado.²⁰

Los cables son muy eficientes dentro de los sistemas constructivos, son muy flexibles y su forma cambia a consecuencia de cargas concentradas, no poseen rigidez a la flexión y no resisten a las fuerzas de compresión.

²⁰ Roberto Santomauro, “Tensoestructuras” 2006, <http://es.scribd.com/doc/178615158/TensoestructurasDesdeUruguay-Sobresaliente-v1> (Fecha de consulta: 12 de abril de 2014)

Cuando a un cable se le aplica una gran fuerza concentrada, se deforma, presentando tramos rectos entre los apoyos y los puntos de aplicación de las cargas; presenta una pérdida de su perfil original y alcanza el denominado “polígono funicular”²¹

Si las cargas son más repartidas se obtienen formas curvas, como lo es la parábola que comúnmente se presenta en los puentes colgantes. Es necesario que exista una reacción horizontal, además de la reacción vertical en los apoyos del cable para que pueda mantener su equilibrio.

Los cables también son utilizados para cubrir áreas y no solamente un plano estructural, pueden estar en grupos de cables paralelos, uno junto a otro o usando conjuntos de cables que conformen sistemas de doble curvatura (cóncava y convexa), además los cables también pueden ser utilizados para cubrir superficies redondas.

-Tipo de alma de un cable:

Los cables con alma de fibra resultan más flexibles pudiendo ser de fibra natural AF (de sisal) o AFA (de polipropileno), en cambio los cables con alma de acero son menos flexibles y más resistentes.

Además de la resistencia en la conformación de un cable se debe tener en cuenta el módulo de elasticidad, su flexibilidad y el tipo de esfuerzo al que será sometido, duración y mantenimiento. Si se requiere, el cable puede ser recubierto, forrado o entubado con materiales plásticos o pintados.²²

Otro factor que se debe tomar en cuenta en la colocación de cables, es la selección y utilización de distintos herrajes de enganche, conexión y aplicación de tensión a los mismos.

²¹Jose Oscar Jaramillo Jimenez, *Análisis clásico de estructuras*, (Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2004)

²² Roberto Santomauro “Tensoestructuras”
<http://es.scribd.com/doc/178615158/TensoestructurasDesdeUruguay-Sobresaliente-v1> (Fecha de consulta: 12 de abril de 2014)

- **Membranas:**

Las estructuras tensadas de tipo membrana son aquellas que utilizan telas flexibles y forman superficies anticlásticas y se unen al suelo por medio de elementos rígidos. Los dos tipos de formas más comunes son la forma de cono (Figura 9) y la de silla de montar (Figura 10)

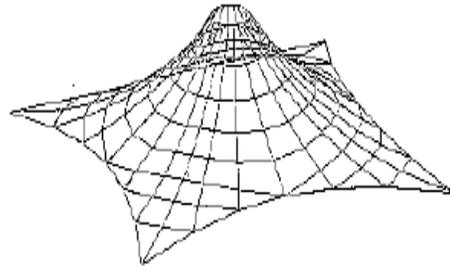


Figura 9: Forma de cono²³

La mayoría de las membranas están fabricadas de fibra de vidrio o textiles de poliéster, las cuales se refuerzan con sustancias como PVC, teflón o silicón.

Los espesores de las membranas van desde 0.5 mm a 1.20 mm y su peso varía entre los 500 g. hasta 1000 g. por M2 aproximadamente, dependiendo del tipo de membrana.

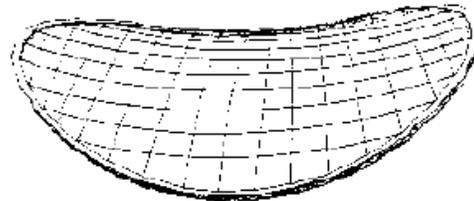


Figura 10: Forma de silla de montar²⁴

El tejido de la membrana actúa como una extensa red de mini-cables bi-direccional de gran resistencia a la tensión, que puede ser desde 10 kg por cm hasta 200 kg por cm. a la rotura para los espesores mencionados, en otras palabras, estas membranas llegan a valores de rotura a la tensión de hasta 20 T por metro de tela, deformándose desde un 3% hasta un 20% antes de su colapso.

-Requisitos a considerar en una membrana:

El tejido determina la resistencia y el comportamiento elástico de las membranas, el cual depende principalmente del grosor, resistencia a la

²³ Enrique Zavala, "velarías" http://innombrables2013.blogspot.mx/2013_01_01_archive.html (Fecha de consulta:12 de abril de 2014)

²⁴ Zavala, "velarías" http://innombrables2013.blogspot.mx/2013_01_01_archive.html (Fecha de consulta:12 de abril de 2014)

tensión del hilo y su densidad, es decir la cantidad de hilos utilizados por cm. para conformar el tejido.

Es importante tener en cuenta que las membranas (en función de la construcción y tipo de tejido) no poseen la misma resistencia ni el mismo modulo de elasticidad en las dos direcciones.²⁵

- **Relingas:**

Son los esfuerzos que se emplean en los bordes de las membranas, ya que en este punto tienden a acumularse las tensiones que las membranas están soportando en cualquier punto de su superficie.

- **Mástiles:**

Los mástiles y bordes rígidos están hechos de materiales convencionales como acero; deben ser fuertes y fáciles de transportar.

Por lo general, es un poste vertical o punto más alto de una tensoestructura; sostiene y tensa la membrana manteniendo su forma. Además soporta los esfuerzos de tensión y trabaja a compresión, lo que se traduce en un comportamiento a flexión.

- **Uniones y accesorios de fijación:**

En la fabricación de una tensoestructura intervienen diversos procedimientos y técnicas para unir de forma firme y segura la membrana con los postes, arcos y accesorios metálicos.

Para la confección de diversos patrones de corte que dan forma a la cobertura se recurren a diversas técnicas de unión:

1. Uniones por ondas de alta frecuencia (HF)

²⁵ Santomauro, "Tensoestructuras"
<http://es.scribd.com/doc/178615158/TensoestructurasDesdeUruguay-Sobresaliente-v1> (Fecha de consulta: 12 de abril de 2014)

2. Uniones por calor (termosellado)
3. Costura con hilos sintéticos
4. Soldadura química en frío
5. Uniones a través de accesorios metálicos²⁶

1.2.3.3 REDES DE CUERDAS

Se entiende como una cubierta basada en la construcción de una red de cuerdas, la cual en cuya superficie sus dos direcciones principales actúan como cuerdas solo por esfuerzos de extensión soportados por elementos de construcción resistentes a la tensión y no a la flexión.

Las arañas tejen redes que parecen no tener algún orden, sin embargo tienen cierta similitud con estas redes de cuerdas. Primeramente hilan un cordón grueso, equivalentes a las cuerdas de relinga o de contorno de las redes de cuerdas abiertas, cruzando un rincón entre muros y con un continuo ir y venir lo refuerzan según su conveniencia. A partir de este hilo, la araña rellena el espacio que queda entre él y las paredes del rincón mediante una gran cantidad de hilos.

“Las telas de araña y las redes de cuerdas fabricadas por el hombre encierran espacios transparentes dignos de particular atención”.²⁷

Las redes de cuerdas pueden tejerse de diversas maneras, de modo que la superficie limitada por un contorno lineal cerrado debe adaptarse a determinadas circunstancias, tomando diferentes formas de reticulado.

²⁶ Alberto Marroquín, *Tensoestructuras*, *Revista digital apuntes de arquitectura Volumen 32*, Octubre de 2011 http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.mx/2011_10_01_archive.html (Fecha de consulta: 03 de Febrero de 2014)

²⁷ Francisco Folguera, *Cubiertas colgantes*, Barcelona (España: Ed. Labor S.A. 1962)

Se requieren de grandes esfuerzos en los puntos de amarre de las cuerdas y deben de ser resistidos y transportados a otros puntos firmes.

-Red de cuerdas tubular

“En las redes de cuerdas tubulares, las cuerdas tensoras se unen a los anillos y sirven para sostener conducciones o para hacer pasar y proteger cuerdas móviles que deben salvar grandes distancias sin apoyos intermedios. Una red tubular con sus cuerdas portantes curvadas resulta muy rígida”.²⁸

1.2.3.4 DETALLES CONSTRUCTIVOS

• Costuras y juntas de taller (cosidas y soldadas) y en obra:

Al unir diferentes paños de un tejido se requiere de una costura o unión, dichas uniones son caracterizadas por transmitir las cargas que circulan a través de las fibras, consta de una perforación en la tela, impermeabilización de la costura y protección del hilo.

En el caso de la soldadura, conectan indirectamente a las membranas ya que la soldadura se hace entre revestimientos. Son dependientes de la adherencia entre el revestimiento y las fibras quedan perfectamente selladas y no necesitan protección adicional.

Recientemente se ha comprobado que mientras el comportamiento de las uniones soldadas es plástico, el de las costuras es elástico hasta la rotura, por lo tanto su capacidad de redistribución de las tensiones está más limitada.

²⁸ Folguera, *Cubiertas colgantes*, Barcelona (España: Ed. Labor S.A. 1962)

Actualmente, las cubiertas se fabrican en una sola pieza, sin embargo es frecuente que necesiten juntas en obra para la unión de diferentes partes mediante acordonado, empresillado, soldado o encolado.

- **Bordes perimetrales flexibles, semi libres y rígidos:**

Los bordes flexibles pueden ser sin refuerzo, reforzados con dobladillo, cinta, cuerda, cable interior o cable exterior.

Los semi libres son con elementos de transición y los rígidos pueden ser con tubo, perfil, empresillados, canal o guía. La rigidez de los bordes influye el estado tensional y la forma de la membrana. Los bordes flexibles se deforman, con lo que relajan las tensiones aumentando la curvatura.

Cuando los claros son menores a 4 metros, no es necesario colocar un refuerzo, es suficiente con el dobladillo, después de los 4 metros, el refuerzo se realiza introduciendo un cable o cordón en el interior del dobladillo o relinga perimetral, el ancho de esta relinga depende del diámetro del cable o cordón no sea mayor a los 15° con tejidos de poliéster ni los 6° con la fibra de vidrio para reducir el riesgo de que se despegue.

Una alternativa al cable o cordón interior es la cinta de refuerzo soldada por el exterior o introducida en la relinga perimetral. Las cintas son muy poco resistentes a los rayos UV, por lo cual es indispensable protegerlas de la radiación solar.

En claros mayores a los 6 metros, el cable debe ser colocado al exterior para poderse deformar de forma independiente a la relinga perimetral, puesto que para los valores más altos de la tensión, las deformaciones son diferentes. En tal caso, las fuerzas pasan de la membrana al cordón perimetral, del cordón perimetral a las presillas, de las presillas a los conectores y de los conectores al cable exterior.

Para unir de forma continua el borde de una membrana con un elemento estructural rígido (tubo o perfil), el borde puede empresillarse y atornillarse de forma que la tensión se transmita de la membrana al cordón perimetral, del cordón a la presilla, de la presilla a los tornillos y de los tornillos al pasamanos, placa, cartela o perfil.

- **Aristas:**

Las aristas, las puntas y los bordes afilados concentran los esfuerzos, cortan la membrana y manifiestan agresividad, se deben suavizar redondeando las puntas, achaflanando las esquinas o interponiendo dispositivos de transición.

- **Esquinas:**

Pueden ser exteriores o abiertas y solapadas o cerradas.

- **Puntos altos y bajos:**

Las cargas que circulan por la superficie de la membrana se concentran hasta llegar al punto de unión. En caso de que la tensión supere el valor admisible, se recurre al ensanchamiento del punto (se convierte en un círculo de mayor o menor diámetro) y al refuerzo de la membrana.

- **Placas de anclaje:**

Bases de mástiles y anclajes. Es favorable que las bases de los mástiles estén articuladas para facilitar el montaje y para que no se transmitan momentos a la cimentación. Sin embargo también pueden estar empotradas en algunos casos.

- **Anclajes:**

Activos (pretensados) y pasivos superficiales (estacas, pilotes, pozos, zapatas, elementos de pantalla, tablestacas, macizos, bolsas, tubos) o

profundos, por ejemplo las placas, hélices, perfiles, troncos, barras, emparrillados o macizos.²⁹

1.2.3.5 REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES

1. Resistencia:

Las uniones conectan diferentes partes entre si y concentran esfuerzos que transmitirán. Se resuelven con esfuerzos para resistir las concentraciones y accesorios que se encargan de la transmisión.

2. Estabilidad:

La estabilidad de las construcciones textiles depende de la integridad de todas sus partes. Para evitar el colapso de la estructura derivado de un fallo local, se pueden utilizar cables redundantes sujetando los puntos críticos de la estructura tales como la parte superior de los mástiles.

3. Flexibilidad y compatibilidad:

Las diferencias de deformabilidad de los materiales requieren espacio o flexibilidad para absorberlas sin que se movilicen esfuerzos que no son necesarios al restringir los movimientos. Este requerimiento se manifiesta en bordes, esquinas y otros puntos de unión. El cable de borde puede quedar coaccionado por la relinga o separado.

²⁹ José Ignacio de Llorens Durán, “Los detalles constructivos de las tensoestructuras”, http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/15512/1/PONENCIA_LLORENS.pdf (Fecha de consulta: 03 de marzo de 2014)

1.2.3.6 GEOMETRIA

1. Superficie funicular:

La membrana sigue el recorrido de las cargas, evita la flexión y facilita la lectura directa del comportamiento estructural. Se debe de mantener esta pauta en las uniones para que no se produzcan excentricidades. Como el cable no sigue a la bisectriz de los bordes, la membrana se arruga.

2. Se necesita espacio para colocar los accesorios y transmitir las cargas. En los anteproyectos y modelos informáticos se acostumbra subestimar las dimensiones de los enlaces, que hay que incrementar si se requiere además impermeabilidad, drenaje o ventilación.

3. El cambio de escala:

Cuando se cambia la escala, no solamente cambia el tamaño, sino también el peso propio, la rigidez, la superficie y el volumen también cambian. El diámetro del cable influye en el tipo de terminal porque modifica la relación entre la superficie y la sección, a medida que aumenta, hay que pasar de los sujeta cables al terminal prensado y del terminal prensado al fundido.

4. Coordinación:

La coordinación es necesaria en los elementos que se tienen que unir y sirve para que las aberturas, distancias, diámetros y gruesos se adapten entre sí”.³⁰

1.2.3.7 CARACTERISTICAS DE UN SISTEMA TENSADO

Un sistema tensado presenta características de luminosidad, aislamiento acústico, respuesta a los factores climáticos y comportamiento estructural.

³⁰ Josep Llorens, *Atlas de detalles de la construcción textil*, (Barcelona, España: Escuela de arquitectura de Barcelona, 2012)

1.2.3.7.1 LUMINOSIDAD

El empleo de las cubiertas tensadas contribuye en el paso parcial de luz. Los requerimientos de luz en las construcciones tensadas son satisfactorios durante el día y por consiguiente existe un ahorro energético.

Durante el día, la iluminación proveniente del sol refleja del 30 al 75%, absorbe del 10 al 60% y del 5 al 20% ingresa dentro del espacio.

Además, las cubiertas tensadas han sido consideradas agradables estéticamente al crear una combinación de luz natural del día con la luz artificial de noche. Su alto índice de reflexión de luz permite a estos materiales crear un efecto de luz indirecta sobre el espacio interior.

Las construcciones convencionales mantienen un nivel de transparencia del 3%, las tensoestructuras varían entre el 10% y el 40%. Dicho nivel es ajustable por medio de la utilización de pigmentos o recubrimientos en las telas tensadas.

“Cabe señalar que en cuanto a las condiciones climáticas, las telas que sirven para las estructuras tensadas sufren cambios térmicos que son transmitidos del exterior al interior casi inmediatamente, la única diferencia entre el exterior y el interior es de 1°C aproximadamente”.³¹

Los materiales utilizados comúnmente reflejan aproximadamente un 75% de la energía solar incidente, absorbiendo el 15% y transmitiendo el 10% de dicha energía en la tabla 1 se pueden observar distintos materiales empleados en cubiertas y sus propiedades de transmisión, reflectancia, y emisividad solar. La transmisión de luz de las telas se encuentra entre un 10-15%. Esta propiedad hace que las estructuras tensadas sean efectivas como protección solar en zonas tropicales y áridas, proporcionando a la vez ventilación natural cuando se trata de estructuras abiertas.

³¹ Javier Sánchez Sierra, “Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real” (tesis de doctorado publicada, Universidad San Sebastián, San Sebastián, España, 2006)

Materiales	Propiedades ópticas (%)					
	Espesor (Bletzinger y Ramm)	Transmisión de luz	Absorción solar	Reflectancia solar	Transmitancia solar	Emisividad, radiación
Poliéster/PVC	0.6	12	15	75	10	86
	0.8	10	18	77	5	86
	1.2	8	19	77	4	86
Fibra vidrio/PTFE	0.6	17	11	72	17	88
	0.9	10	20	70	10	88
Poliéster/Silver PVC	0.7	3	25	72	3	35

Tabla 1: Propiedades ópticas de materiales textiles para uso estructural³²

1.2.3.7.2 FACTORES CLIMATICOS

Las tensoestructuras (Figura 11) son utilizadas principalmente en base a la necesidad del ser humano para protegerse contra el clima (sol, lluvia, viento o nieve).

Un inconveniente en dichas estructuras es que ocasionalmente, cuando las alturas y volúmenes a cubrir son muy elevados pueden crearse condiciones térmicas que no son uniformes. Esto complica el conocer un estimado sobre la condición térmica en las zonas próximas a la altura humana. Puede existir una variación en la temperatura superior al 10% entre los puntos más elevados y el nivel de piso.

Para resolver esto, es recomendable utilizar cerramientos de doble capa para asegurar un adecuado aislamiento térmico en el interior.

³² Sánchez Sierra, “Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real” (tesis de doctorado publicada, Universidad San Sebastián, San Sebastián, España, 2006)

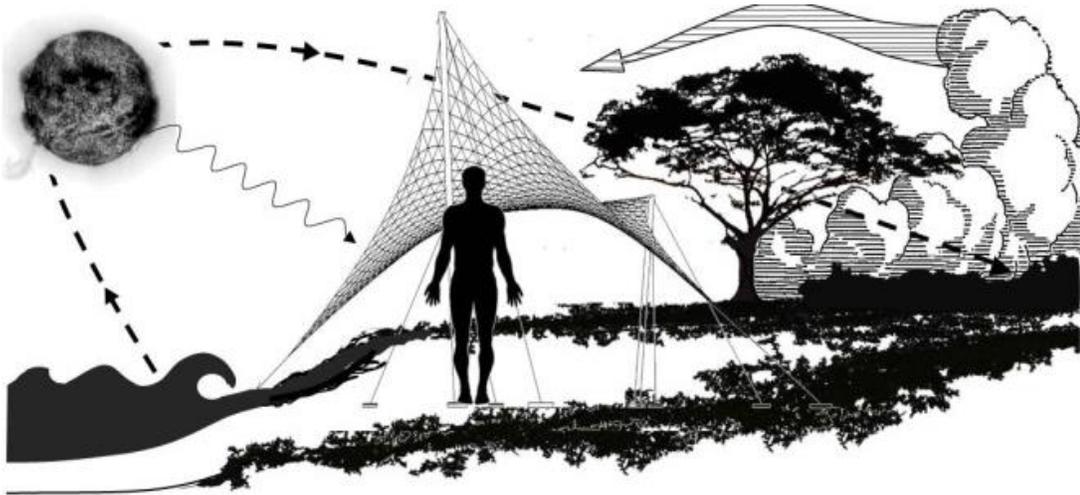


Figura 11: Tenso estructura y los elementos climáticos³³

1.2.3.7.3 AISLAMIENTO ACÚSTICO

Resulta complicado el tener un control acústico libre de ruidos externos en el interior de una tensoestructura, esto podría resultar una dificultad en la propagación del audio.

Sin embargo, la acústica en el interior puede mejorar mediante la geometría y los materiales empleados, sin embargo algo más eficiente y comprobado es el utilizar doble capa en las estructuras, esto aporta una mejora al aislamiento acústico aunque no más de 5 a 10 dB.

Es común instalar paneles, bandas acústicas u otros elementos que favorecen el diseño acústico.

³³ Flor Jan-Frederick, Criterios climáticos para el diseño de tenso estructuras en regiones del trópico húmedo, http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/2011_2/tensoestructuras/Tensoestructuras%20en%20regiones%20tropicales%20humedas.pdf (Fecha de consulta: 01 de noviembre de 2014)

1.2.3.7.4 AISLAMIENTO TÉRMICO

Las membranas cuentan con una capacidad que les permite reflejar y absorber radiación en forma de calor.

Las membranas tienen una alta conductividad térmica (de 5.5 a 9 w/m² °C) debido a su mínimo espesor y solo existe una mejora con el agregado de capas con materiales aislantes interiores y/o con una capa adicional de membrana formando una cámara de aire.

La transmisión de calor radiante en las membranas opacas hacia el interior del local no es significativa, debido a su bajo factor solar (menor al 20%)”³⁴

Las estructuras tensadas tienen la ventaja de adaptarse a cualquier tipo de clima, debido a que están conformadas por materiales de baja inercia térmica y un buen comportamiento ante la radiación solar. Al utilizar cubiertas textiles en fachadas, se puede reducir de forma considerable la ganancia térmica del edificio.

En el caso de las cubiertas sin cerramientos laterales, estas permiten la ventilación cruzada y el enfriamiento pasivo en el interior. En climas calientes y húmedos son de gran importancia los aleros holgados para la protección de lluvia. En base a esto, la membrana debe ser impermeable, pero debe de permitir el flujo continuo de brisas a través de membranas traslapadas y conoides que actúan como chimeneas de ventilación.

³⁴ Santomauro, “Tensoestructuras”
<http://es.scribd.com/doc/178615158/TensoestructurasDesdeUruguay-Sobresaliente-v1> (Fecha de consulta: 12 de abril de 2014)

1.2.3.7.5 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las membranas flexibles responden a la acción de cargas únicamente por medio de esfuerzos a tensión. Es importante que la fuerza de pretensado sea suficiente para que la membrana pueda mantenerse a tensión bajo cualquier condición de carga.

Además, la rigidez es proporcionada por la tensión inicial dada y esto ayuda a que la deformación que la membrana pueda sufrir sea mínima.

La estabilidad es dependiente de la geometría tridimensional curva que se le da al recubrimiento textil cuando es pretensado. Cuando existen cargas perpendiculares a la superficie, estas tienden a deformarse creando curvas tridimensionales y desarrollan tensiones superficiales, similar a lo que ocurre en un sistema de cables cruzados. Además, aparecen esfuerzos tangenciales cortantes que se asocian con el giro, por lo tanto se trata de superficies que se comportan como funiculares a excepción de los casos en los que aparecen compresiones, es decir, las arrugas que aparecen en la membrana.

El comportamiento de cables y tejidos no es de forma lineal, su resistencia se proporciona a través de grandes deformaciones, es decir que las tensiones de la membrana dependen de su posición final en el espacio.

El comportamiento no lineal de las membranas también afecta la fluencia y la refracción de la superficie (sensibilidad a los cambios de temperatura y humedad) pueden existir cambios en la geometría ocasionados por el deslizamiento entre las abrazaderas y el tejido.

Las membranas también son muy vulnerables a las cargas dinámicas que les producen fatiga reduciendo su resistencia con el paso del tiempo.

- **Pretensado:**

Como ya se mencionó, esta etapa es muy importante para la eliminación de arrugas que quedan por imperfecciones en la construcción o en el diseño de la cubierta. Las telas rígidas requieren pretensarse más que las telas flexibles.

Otro aspecto a considerar en la determinación del esfuerzo del pretensado es la temperatura. Si la membrana se tensa a temperaturas altas, los esfuerzos de pretensado aumentan al reducirse la temperatura y a la inversa si se tensa a bajas temperaturas, se observara un aflojamiento de la membrana con eventual formación de arrugas al aumentar la temperatura.

Generalmente los esfuerzos internos de pretensado no son constantes sino que varían punto a punto, esto depende de la variación de la forma de la membrana. En las membranas de tipo paraboloides la variación es mínima, sin embargo en las de tipo conoides no ocurre lo mismo.

“En consecuencia las tensiones en este tipo de membranas no pueden considerarse constantes, sino por el contrario, aumentan de forma considerable en las proximidades del vértice, siendo necesario reforzar esa zona con 2 o 3 telas superpuestas”.³⁵

Se denomina una superficie alabeada (paraboloides hiperbólicas) o anticlástica a aquella superficie que, análogamente a los dos cables tensados en dirección contraria, presentan una superficie curvada en dos direcciones, perpendiculares u oblicuas en sentido contrario. En el caso de que dichas superficies estén formadas por un conjunto de cables o hilos entretelados en sentido perpendicular u oblicuo, cada grupo de cables o de hilos curvados en un sentido mantendrá fija la posición de cada cable o hilo del conjunto curvado en el sentido contrario.

³⁵ Santomauro, “Tensoestructuras”
<http://es.scribd.com/doc/178615158/TensoestructurasDesdeUruguay-Sobresaliente-v1> (Fecha de consulta: 12 de abril de 2014)

“Las direcciones principales de curvatura serán aquellas que tengan las máximas curvaturas y por tanto los menores radios de curvatura. Los radios de curvatura siempre son normales a la superficie alabeada”.³⁶

- **Curvaturas:**

Para que el sistema pueda funcionar correctamente desarrollando el trabajo de los materiales, se buscan las curvaturas en las membranas y cables.

Un elemento tensado recto, si no es capaz de absorber flexiones, por ejemplo un cable, se deformará al actuar una carga normal oblicuamente a su eje, por ejemplo un puente colgante. Si se pretende que la deformación sea reducida, el cable deberá de ser sometido a una gran tensión.

Surgirá una deformación bajo la acción de cargas exteriores cuando una estructura plana realizada con membranas de tejidos sea sometida a una tensión baja. “Para que no existan estas deformaciones, así como las fuertes tensiones en los elementos y anclajes, que se presentan en estructuras tensionadas con una carga uniformemente repartida y que actúa perpendicularmente al eje de la estructura, dicha estructura deberá de estar curvada en la dirección de actuación de la carga exterior”.³⁷

Las tensiones de trabajo de los elementos serán directamente proporcionales a los radios de curvatura, esto quiere decir que a mayor grado de curvatura, mayor tensión e inversamente proporcionales a las flechas de los radios de curvatura, es decir, a mayor flecha, menor tensión. Es aconsejable utilizar en el diseño de las curvaturas flechas entre un 10% a un 20% del claro.

³⁶ Frei Otto, Estructuras. *Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. (Primera edición) (Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A., 1973)

³⁷ Otto, Estructuras. *Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. (Primera edición) (Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A., 1973)

Las superficies que se generan pueden ser de simple o doble curvatura, en el caso de las de doble curvatura pueden ser sinclásticas o anticlásticas, siendo las últimas de mejor rendimiento estructural frente a la aplicación de cargas externas.

Se entiende como una superficie de doble curvatura anticlástica, aquella que al ser seccionada mediante 2 planos verticales ortogonales entre sí en cualquier punto de la superficie se obtienen 2 arcos de circunferencia, con concavidades de signo opuesto.

- **Catenaria:**

Los elementos estructurales que no son rígidos son deformados según una catenaria al ser suspendido por sus extremos bajo la carga uniformemente repartida de su propio peso. No existe una uniformidad en la proyección horizontal de las cargas que actúan sobre la catenaria. La forma de la catenaria es independiente de la magnitud de las cargas.

Resulta casi imposible el tensar completamente un cable debido a su propio peso, ya que sería necesario aplicar una fuerza de tensión infinita.

Cuando una estructura no es pretensada, es de gran importancia en el diseño y cálculo ya que en general, se determina su forma.

- **Pendientes:**

Las superficies deben de tener pendientes relativamente elevadas para la correcta evacuación del agua pluvial.

Las pendientes dependen de la separación de los elementos estructurales (cuanto más separación, más pendiente), de la tensión de pretensado de la membrana y de cómo son los bordes de la cubierta (si los bordes son libres, desaguan mejor que los bordes rígidos).

En algunos casos y en líneas generales se aconseja un ángulo de 15° - 20° (pendiente del 26% al 36%).

En la figura 12 se observa un estudio realizado para determinar las áreas susceptibles a almacenar agua de lluvia en la superficie de una cubierta tensada.

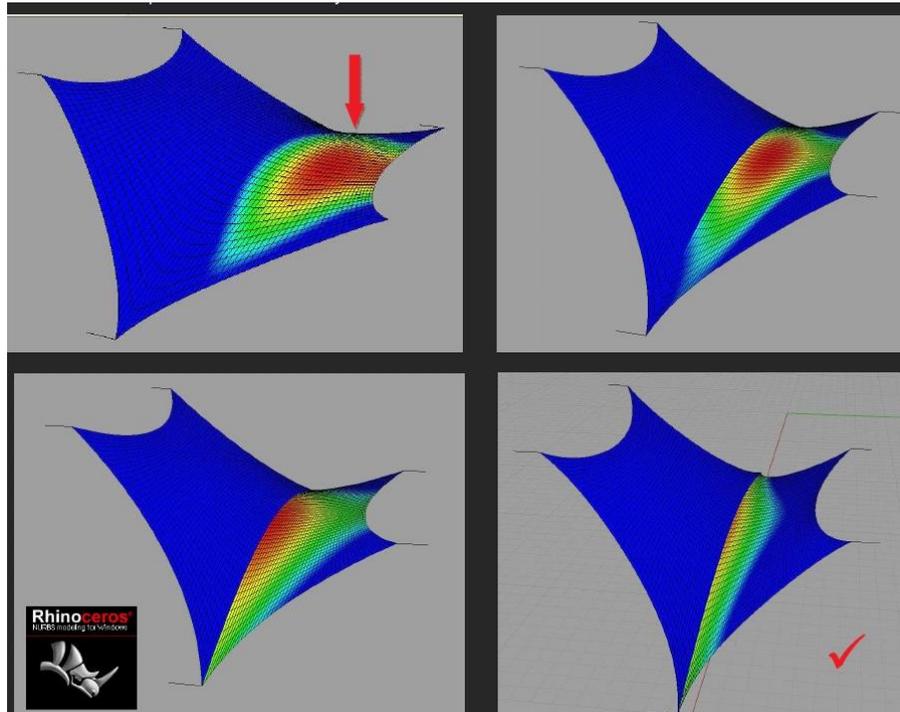


Figura 12: Estudio de cubiertas tensadas con geometría de paraboloides hiperbólicos³⁸

1.3 TENSOESTRUCTURAS INSPIRADAS EN LA NATURALEZA

Alguna vez hemos observado y apreciado las formas de una planta o un ser vivo, a su vez hemos contemplado que presentan un diseño único y un funcionamiento que no altera el equilibrio del medio físico que lo rodea, las plantas y los seres vivos no solamente tienen una función en su medio natural, a su vez son estéticos, armónicos, agradables y simétricos.

³⁸ Marroquín, Tensoestructuras, *Revista digital apuntes de arquitectura Volumen 32*, Octubre de 2011 http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.mx/2011_10_01_archive.html (Fecha de consulta: 03 de Febrero de 2014)

En un lapso de 3800 millones de años los seres vivos han aprendido a volar, a vivir en las profundidades del océano y en las montañas más elevadas, a iluminarse por sí mismos durante la noche y a atrapar la energía del sol, ellos ya han hecho todo lo que hemos querido realizar nosotros, sin contaminar ni poner en riesgo su futuro.

La naturaleza funciona por medio de ciclos cerrados, es biodegradable, reconvierte y descompone lo que desecha, sus procesos son efectuados a temperatura ambiente y por lo general no son tóxicos, a diferencia de la forma de satisfacer nuestras necesidades, nuestros procesos al construir son altamente contaminantes a causa de la elevada cantidad de energía que se utiliza al fabricar un material constructivo y por consiguiente las emisiones de carbono hacia la atmosfera contribuyen al deterioro del medio en el que vivimos y a la salud misma.

“Es evidente el papel que desempeña la producción de materiales de construcción en la aportación a los niveles de generación de energía, cabe recalcar que México ocupa el lugar #14 en la producción mundial de energía”³⁹

El factor de contaminación ha hecho mucho ruido en las últimas dos décadas y va en crecimiento, el mundo natural nos ofrece soluciones a problemas que nos hemos planteado, observando a detalle y estudiando la función y ciclo de vida de plantas y animales.

Se torna interesante poder imitar los procesos y diseños naturales para producir materiales tecnológicos con el fin de reducir la alteración del equilibrio ecológico y no produzcan efectos dañinos a la salud, existe un término para denominar lo anterior y es una ciencia que está siendo adoptada por médicos, arquitectos, ingenieros, biólogos, químicos, formando

³⁹ Alejandro Fernández del Castillo de la Concha, “Certificación de materiales de construcción con principios aplicados de biomimetica”, (Tesis de maestría, México, UNAM, Diciembre de 2012)

así equipos multidisciplinarios encaminados hacia un mismo fin, la biomimética.

“La aplicación de la biomimética es una necesidad ya que impulsa el desarrollo sustentable, ahorro de energía y reduce nuestra huella ecológica”⁴⁰

Si aprendiéramos de la naturaleza, podríamos producir como las plantas y animales utilizando la energía solar y compuestos simples para fabricar fibras biodegradables, materiales plásticos, cerámicos y otros productos, “así pues, admitir que hemos llegado a nuestros límites puede ser una oportunidad para dar el salto a una nueva etapa en la que nos adaptamos a la tierra en vez de adaptarla a nosotros”⁴¹

Cuando observamos a profundidad el entorno natural, nos damos cuenta que nuestros inventos ya habían surgido posteriormente en la naturaleza de una forma más sustentable, elegante y menos costosa, por ejemplo el sistema de los termiteros para mantener una temperatura constante de 30° C supera a nuestros sistemas de enfriamiento y calefacción de aire; en comparación con la transmisión multifrecuencial de los murciélagos, nuestro radar más complejo es difícil de oír, los materiales que nosotros consideramos “inteligentes” no son siquiera comparados con la trompa de las mariposas o la piel del delfín, la combinación de sustancias químicas de las algas para encender sus linternas corporales o la capa de pelos transparentes que mantiene a los osos polares en acción durante el invierno.

En palabras de Janine Benyus⁴², la naturaleza emplea los siguientes principios:

⁴⁰ Paula Croci, “Biomimética aplicada a los textiles”, <http://www.slideshare.net/mirolipresentacion-biomimetica-aplicada-a-los-textiles> (Fecha de consulta: 23 de agosto de 2013)

⁴¹ Janine Benyus, *Biomimesis Innovaciones inspiradas por la naturaleza*, (España, Tus Quets editores, 2012)

⁴² Janine Benyus es bióloga, consultora en innovación y autora de 6 libros, incluyendo “Biomimesis: Innovaciones inspiradas en la naturaleza”

- La naturaleza cabalga sobre la luz solar
- La naturaleza gasta solo la energía que necesita
- La naturaleza ajusta la forma a la función
- La naturaleza lo recicla todo
- La naturaleza premia la cooperación
- La naturaleza cuenta con la diversidad
- La naturaleza demanda tecnología local
- La naturaleza frena los excesos desde dentro
- La naturaleza saca partido de las limitaciones

Si nuestro mundo se pareciera y funcionara mas como el mundo natural, tendríamos más probabilidades de sobrevivir en él, la mayoría de las aplicaciones de la biomimética se han desarrollado en el campo de los biomateriales debido a que involucra la síntesis o copia de materiales biológicos y su aplicación en diseños, la mayor ventaja de un biomaterial es que se biodegradan.

Resulta complicado revelar los secretos de la naturaleza, la biomimética es una ciencia joven, a pesar de que desde nuestros inicios fue Darwin uno de los precursores al observar las aves para diseñar un sistema inspirado en sus alas, sin embargo el desarrollo de la tecnología crece día con día y apoyada de otras ciencias como la nanotecnología, es posible analizar profundamente el objeto de estudio y emularlo mediante un producto.

Existe un gran número de investigaciones que se están llevando a cabo en la actualidad para desarrollar nuevos materiales y mejorar los existentes con base a los principios de la biomimética, tal es el caso de una arquitecta que produce y diseña un material muy resistente: la araña, la seda que

produce y la forma de sus singulares telarañas servirán como inspiración para conformar una cubierta tensada.

“Una telaraña es una de las estructuras que las arañas fabrican con la seda que ellas mismas producen. La seda es un material fibroso que es secretado por las glándulas especiales de algunos artrópodos (insectos, arácnidos y ácaros)”⁴³.

La tela de araña es un material biológico producido por una glándula especial que las arañas tienen en su cuerpo y es 3 veces más resistente en comparación al peso que soporta el acero, “se ha medido que la resistencia de los hilos de la tela de la araña es de 1154 megapascales mientras que la del acero es de tan solo 40”⁴⁴.

Durante muchos años, científicos alrededor del mundo han dedicado gran parte de su vida a investigar e intentar imitar la seda de araña, sin embargo no han tenido mucho éxito, con la evolución de la tecnología, en la última década se han logrado avances significativos en cuanto al tema, el propósito es producir un material que pueda aplicarse en áreas de la medicina e ingeniería.

Actualmente existen investigaciones y empresas que están produciendo seda a gran escala, imitando las composiciones químicas de este singular material. Los casos más importantes y aportativos al campo de la ciencia de los materiales son los que se mencionan a continuación.

Europa realiza investigaciones respecto al tema, un ejemplo de ello es Amsilk⁴⁵ una empresa alemana que ha desarrollado una fibra a la que denominaron “Biosteel” la cual consiste en un material con una alta tenacidad

⁴³ Guillermo Ibarra Nuñez, “Seda de araña” Junio de 2008, <http://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/115/seda-de-arana>, (Fecha de consulta: 05 de Octubre de 2013)

⁴⁴ Enrique Rocha Rangel, *Revista ciencias*, 2010, UNAM #98

⁴⁵ Amsilk es una marca registrada en la Unión europea, Estados Unidos de América y en Japón, <http://www.amsilk.com>

y es similar a la seda de araña, la fibra es lisa y brillante, su aplicación es para la fabricación de textiles de alto rendimiento, artículos deportivos y textiles quirúrgicos.

La mayoría de las sedas de araña tienen propiedades mecánicas excepcionales, presentan una combinación única de alta resistencia a la tensión y extensibilidad. Esto permite que una fibra de seda absorba una gran cantidad de energía antes de romperse.

Una telaraña es una de las estructuras más sorprendentes encontradas en la naturaleza, las arañas construyen dichas estructuras por medio de la seda que ellas mismas producen. La seda es un material fibroso secretado por algunos artrópodos por medio de glándulas especiales.

Las arañas producen la seda con diferentes clases de elasticidad, resistencia, flexibilidad, grosor, adhesividad, afinidad o repelencia al agua.

Existen 4 tipos de hilos en una telaraña común; los utilizados como amarres, los que conforman el marco perimetral, los hilos radiales y los circunferenciales que configuran la espiral de captura.

A lo largo de su evolución, las arañas han fabricado sus telarañas guiándose por dos patrones, las telas que son denominadas tridimensionales están constituidas por un número considerable de hilos formando una malla tridimensional. Dicha tela tridimensional disipa la energía cinética de la presa mediante la deformación y rotura de los hilos que la forman, es por eso que la rotura de algunos hilos no debe suponer la rotura de la estructura, presentando el inconveniente de la gran cantidad de material que se requiere para su construcción.

En oposición, las telas bidimensionales se caracterizan porque todos los hilos están dispuestos sobre un plano, por lo que la rotura de unos pocos

hilos puede provocar el colapso de la estructura.⁴⁶ En las telas bidimensionales hay un mayor ahorro de material, en especial en la seda MA que es utilizada como elemento estructural, hace capaz de disipar la energía cinética de la presa sin romperse, combinando en un solo material una gran resistencia mecánica y deformación a rotura, cuyas propiedades no han sido tan optimizadas en las telas tridimensionales.

Basándonos en esto, se pudiera conformar una cubierta apegándonos a un material que provenga de la naturaleza y que el proceso de hilado pudiera ser similar al tejido en las telas de arañas.

1.4 EJEMPLOS DE TENSOESTRUCTURAS

1.4.1 CUBIERTAS TEXTILES JAPONESAS

Estas cubiertas fueron diseñadas por el Ing. Taiyo Kogy, especialista en membranas y telas.

En la figura 13 se pueden observar las membranas tensables ubicadas en el circuito internacional de Shanghai, su diseño está inspirado en las hojas de loto.



Figura 13: Tribuna del circuito internacional de Shanghai protegidas por estructuras tensadas.⁴⁷

⁴⁶ Gracia Belén Perea Abarca, "Influencia de la radiación ultravioleta en el comportamiento mecánico y en la microestructura de las fibras de seda de araña" (Tesis doctoral, Madrid, España, Universidad politécnica de Madrid, 2010)

⁴⁷ Niponica, <http://web-japan.org/niponica/niponica11/es/feature/feature05.html> (Fecha de consulta: 25 de febrero de 2014)

Las estructuras constan de 26 cubiertas, hechas a base de fibra de vidrio cubierta de fluoroplástico, cada estructura con forma de hoja es una elipse que mide 31.6 m. de largo y 27.6 m. de ancho y está sostenida por un pilar con una estructura de acero de 1 metro de diámetro.

Como cubiertas, las estructuras de membranas son ligeras y además brindan una mejor iluminación, siendo utilizadas de manera general en estadios construidos sin columnas de soporte, así como en grandes espacios con diseños arquitectónicos innovadores.

“Sin embargo, no resulta sencillo fabricar este tipo de materiales, son pocas las compañías alrededor del mundo que tienen los conocimientos en cuanto a manufactura de tejidos y la ejecución de diseño para crear estructuras de tres dimensiones de membranas tensadas”.⁴⁸

1.4.2 STAR

Star es una carpa de diseño conoide Hexagonal (figura 14) hecha con un mástil central de aluminio o acero galvanizado, lona de P.V.C. de 450 grm².



Figura 14: Cubierta Star⁴⁹

⁴⁸ Niponica, “Textiles japoneses de alta tecnología”, <http://webjapan.org/niponica/niponica11/es/feature/feature05.html> (Fecha de consulta: 25 de febrero de 2014)

⁴⁹ Star, especialistas en sombra, <http://star-carpas.com/> (Fecha de consulta: 26 de marzo de 2014)

Existe una empresa con matriz en España que se dedica a la fabricación y renta de este tipo de cubiertas y cuentan con todas las certificaciones de seguridad europeas.

Dichas cubiertas están constituidas por una lona, un mástil y estacas para amarrarla al suelo. Resulta muy eficaz ya que reduce los tiempos de instalación y su montaje es muy sencillo.

1.4.3 CUBIERTA DEL ESTADIO OLIMPICO DE MUNICH

Diseñada por el Arquitecto e Ingeniero Estructural Frei Otto, es una estructura que consta de una superficie de 74,800 M² y tiene una malla rectangular de cables pretensados (Figura 15) distanciados en 75cm hacia ambos lados y con un ángulo de intersección variable, lo cual hace posible que se adecue a las curvaturas que posee la cubierta.⁵⁰

El objetivo de Otto era conseguir un mínimo impacto sobre el parque, como un velo tendido sobre una colina.

El cerramiento de la estructura consiste en una lámina de poliéster revestida de PVC, de 2.9 x 29m y 4mm de espesor. Para evitar deformaciones a causa de la temperatura, descansa sobre válvulas de neopreno. La tela está suspendida sobre 12 mástiles de acero de más de 80m de longitud.

Elementos que componen la cubierta:

- Ancho del elemento de membrana 75 x 75cm.

⁵⁰Sebastián Rojas, "Caso de estudio: estadio olímpico de Munich", http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Caso_Estudio_Estadio_Olimpico_de_Munich_/Frei_Otto_-_Proyecto_Stuttgart_21_-_Sagrada_Familia_/A.Gaudi. (Fecha de consulta: 26 de marzo de 2014)

- Cables de borde cordones cerrados.
- Cables interiores cordones abiertos.
- Nudos de acero de fundición.
- Mástiles de tubos de acero.
- Cubierta cristal acrílico (Plexiglás).



Figura 15: Cubierta del estadio olímpico de Munich⁵¹

1.4.4 PROYECTO DE CUBIERTA PARA EL CASTILLO FERRARA

El proyecto de cubrir el patio interior del castillo de Ferrara, (Figura 16) en Italia, se basa principalmente en una revisión de los modelos figurativos, con dos requisitos principales: respetar tanto los muros del castillo como el suelo del patio.

⁵¹Deconstructivismo, <http://www.slideshare.net/bkatzgarcia/modernidad-tarda-racionalismo-desconstructivismo-alta-tecnologia> (Fecha de consulta: Marzo de 2014)



Figura 16: Cubierta para el castillo de Ferrara.⁵²

La membrana parece estar flotando en el aire, no tiene cimientos en el suelo ni pesados puntos de anclaje en las paredes, solamente algunos puntos de apoyo. Se suspende con delgados cables de acero a una estructura metálica de forma cuadrada y de sección transversal circular anclados en puntos de apoyo, que transfieren solamente fuerzas verticales a las paredes. Se sitúa por encima de la cornisa del segundo piso del castillo, de forma que se hace invisible desde el nivel del suelo. A partir de aquí la estructura tensada desciende en forma de paraguas invertido hacia el centro del patio.

La forma inicial de dodecágono se convierte en un embudo que permite evacuar el agua de lluvia y la nieve gracias a un pequeño drenaje en el centro de la pavimentación octogonal por ladrillos.

⁵²María Sansa, Jordi Martínez, La edad de oro de la protección solar, *Revista toldo*, <http://revistatoldodigital.org/2013/n32013/index.html#/24/> (Fecha de consulta: Marzo de 2014)

El desagüe está rodeado por el contrapeso de la estructura que se ancla al suelo: es una especie de pozo de hierro fundido con forma dodecagonal, esta base sirve para mantener la estructura estable.

El toldo que cuelga de la estructura metálica fijada sobre la cornisa se compone de dos coberturas: un blanco en forma de corona de doce lados, y la segunda, paralela a la primera.

En la parte superior, para equilibrar las fuerzas de pre-tensión y cargas climáticas, se concibe una estructura plana de planta cuadrada, que se "oculta", por encima de la cornisa situada a una altura estimada en alrededor de 14-15m. ⁵³

⁵³ María Teresa Ceola ,et al, "Proyecto cubierta para el castillo ferrara", *Espazio: revista nacional e independiente sobre arquitectura textil*.2014

CAPITULO II

2.1 EL ORIGEN DE LAS FIBRAS

El imitar a la naturaleza ha sido un impulso que los seres humanos han tenido desde siempre y muchas veces lo han hecho sin siquiera darse cuenta.

Después de usar durante muchos siglos cuerdas fabricadas con fibras naturales y de haber aprendido a deformar los metales blandos (oro y cobre) el siguiente paso fue la fabricación de cuerdas con hilos metálicos, al principio eran utilizadas con fines decorativos y después con objetivos estructurales.

En la actualidad los hilos metálicos son utilizados para muchas soluciones arquitectónicas, sin ellos muchos logros e innovaciones de nuestra época no serian posibles. La fabricación de hilos metálicos se utilizó de forma artesanal hasta la llegada de la revolución industrial.

A principios del siglo XIX la demanda de hilos metálicos aun era muy escasa, el empleo de los cables se comenzó a generalizar a partir de 1850.

En 1883 se inauguró el puente de Brooklyn y fue considerado como la octava maravilla del mundo, estaba soportado por 4 grandes cables de 400 mm de diámetro, se utilizaron en total 24,000 km de alambre de acero.

En 1998 fue inaugurado el puente de Akashi Kaikyo, cerca de Kobe, con el alambre que se utilizó para construir este puente, se podía dar 7 veces la vuelta al mundo.

Resulta evidente la cantidad de hilos que se tiene que utilizar para fabricar un cable y por consiguiente, su daño al medio ambiente.

El hilo de acero es el elemento básico de un cable, al comparar las propiedades de los hilos obtenidos seleccionando fibras naturales, por ejemplo las cuerdas de cáñamo, con los cables de acero, se han observado algunas ventajas y desventajas:

-La resistencia de los cables de acero es de 1,000 Mpa (10,000Kg/cm²), muy superior a la del cáñamo, que es de 285 Mpa (2850Kg/cm²) y en cuanto a su resistencia específica para el acero es de 225 MN m/kg. Y para el cáñamo 120 MN m/kg.

-La deformación a rotura del cáñamo es superior al cable de acero, mientras que la del cáñamo es de 10% la del acero es de 1%.⁵⁴

Los cables de acero son más pesados, su densidad relativa es de 4 frente a 0.7 y los dos se deterioran en ambientes húmedos, las fibras de cáñamo se pudren mientras que los cables de acero se oxidan.

El diseño de materiales compuestos promete ser en el futuro una de las principales actividades en la ingeniería de materiales.

Como se ha visto, la aplicación de las técnicas textiles adaptadas para ser habitables existían ya desde los inicios de la humanidad, los textiles siempre han sido parte fundamental en la vida del hombre.

Los primeros tejidos eran fabricados con materiales naturales como la seda o lana por medio de procesos elementales y posteriormente ayudándose de sistemas más técnicos se hizo posible la utilización del algodón y el lino.

A finales del siglo XIX, se introdujo el rayón, el cual imitaba las propiedades de la seda pero hecha a partir de una fibra artificial así fue como los tejidos se iban perfeccionando.

⁵⁴ Manuel Elices Calafat, De las cuerdas de cáñamo, a los hilos de araña, <http://www.rac.es/ficheros/doc/00339.pdf> (Fecha de consulta: 24 de marzo de 2014)

Es durante el siglo XX cuando realmente creció el interés por el estudio de los tejidos sintéticos, tal hecho desarrollaría aun más las capacidades creativas de diseñadores y arquitectos.

En 1935 se introdujo el nailon, un material conformado por filamentos elásticos muy resistentes, el cual actualmente es aplicado en la industria de la moda, en la construcción, decoración, etc.

La introducción de las fibras sintéticas fue muy importante, se entiende por fibra sintética a los polímeros con largas cadenas de átomos de carbono junto a átomos incorporados generalmente de hidrogeno, nitrógeno y oxígeno; en contraposición a las fibras naturales puesto que se destruirían, los polímeros pueden ser disueltos o fundidos para lograr la forma del hilo.⁵⁵

Los científicos de materiales deben tomar en cuenta lo siguiente:

- La composición
- La resistencia
- El peso
- Las propiedades de absorción de energía
- La maleabilidad (formabilidad)

2.2 FIBRAS SINTETICAS

Las telas que se utilizan para la fabricación de cubiertas tensadas están constituidas generalmente por un grupo de fibras entrecruzadas en dos direcciones, esto le proporciona las características mecánicas a la tela y son recubiertas con resinas para proteger las fibras.

Las fibras pueden ser de algodón, poliamida, poliéster, fibra de vidrio, aramida, PTFE (Politetrafluoroetileno o Teflón) o fibras de carbono. Las que

⁵⁵ Alejandro Bahamon, *Arquitectura textil: transformar el espacio*, (Barcelona España: Instituto morisa de ediciones, S.A., 2004)

más se emplean en arquitectura textil son la fibra de poliéster y la fibra de vidrio⁵⁶

En la tabla 2 se pueden observar los materiales comúnmente empleados en la construcción de cubiertas velarías y sus diferentes resistencias.

FIBRA	ESFUERZO (Kg/cm2)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm2)
Resina de poliéster ⁵⁷	372	17,862
Resina de Poliester +fibra de vidrio ⁵⁸	755	34,049
Politereftalato de etileno ⁵⁹	800	---
Mylar ⁶⁰	1961.2	48,049.4

Tabla 2: Propiedades mecánicas de las fibras textiles⁶¹

El recubrimiento de las fibras sirve principalmente para protegerlas contra daños climáticos (rayos UV, abrasión, etc.), para estabilizar la geometría de las fibras, para permitir un sellado térmico entre las diferentes telas y para pintar la tela si desea.

⁵⁶ Sánchez Sierra, “Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real” (tesis de doctorado publicada, Universidad San Sebastián, San Sebastián, España, 2006)

⁵⁷ Juan Daniel Trejos Taboda, “propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparándolas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio” universidad tecnológica de Pereira, 2014

⁵⁸ Juan Daniel Trejos Taboda, “propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparándolas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio” universidad tecnológica de Pereira, 2014

⁵⁹ Goodfellow, “materiales para la investigación científica y fabricación” <http://www.goodfellow.com/S/Politereftalato-de-Etileno.html> (Fecha de consulta: 15 de mayo de 2015)

⁶⁰ Du pont teijin films, “mylar polyester film, physical-thermal properties” <http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/technicalinfo.aspx> (Fecha de consulta: 15 de mayo de 2015)

⁶¹ Sánchez Sierra, “Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real” (tesis de doctorado publicada, Universidad San Sebastián, San Sebastián, España, 2006)

A continuación se muestran diferentes tipos de fibras empleadas en cubiertas ligeras, así como materiales que funcionan como recubrimiento:

Fibras naturales:

Lino, lana, cáñamo, algodón

Fibras sintéticas:

Polietileno, poliamida, viscosa, poliéster, acrílicas, aramida

Fibras metálicas:

Acero, aleaciones de cobre, acero inoxidable, aluminio

Fibras minerales:

Vidrio y carbón

Materiales para recubrir las fibras:

Cloruro de polivinilo (PVC), Poliuretano (PV), Neopreno, Caucho, Polietileno Clorosulfonado, Teflón (P.T.F.E. y F.E.P.), PVC con polímero plastificador (P.V.F o P.V.D.F.) y Silicón⁶²

2.2.1 TEXTILES SINTETICOS

1. Fibra de poliéster recubierta con PVC

Este tipo de material es el más extendido en las estructuras tensadas. Se utiliza para estructuras permanentes, siendo su vida de 15 a 20 años.

2. Fibra de vidrio recubierta con PTFE (teflón)

⁶² Juan Valcárcel Pérez, Estructuras textiles,2002 <http://departamentos.etsa.udc.es/webdtcon/wp-content/uploads/2009/10/5-estructuras-textiles.pdf>. (Fecha de consulta: 13 de marzo de 2014)

Su uso está también extendido para estructuras permanentes, siendo su vida de aproximadamente 30 años. Es considerada una fibra no combustible. Los niveles de transmisión de luz pueden llegar al 25%.

3. Fibra de vidrio recubierta con silicón

Este recubrimiento es más flexible que el teflón por lo que resulta más sencilla su manipulación y transporte. Su transparencia varía del 25% al 40%. El uso de la silicona como recubrimiento ocasiona problemas de uniones entre telas en un comienzo y se considera un recubrimiento que puede atraer la suciedad.

4. Fibra de PTFE recubierta con PTFE

Es completamente resistente a los rayos UV y a la acción de ácidos. La textura es parecida a una seda fina, siendo altamente flexible y con frecuencia se utiliza como material para estructuras retráctiles. La transparencia es del 40%, pudiendo disminuirse si fuese necesario.

5. Fibra de aramida recubierta con PVC, PTFE o silicona

Dada su gran resistencia, se utiliza para aplicaciones especiales. Su poca resistencia a los rayos UV hace necesaria su protección, disminuyendo su transparencia.

6. Fibras de PVDF

Es un material que puede ser recubierto con Fluoropolímeros o Poliuretano. El nivel de transparencia llega al 95%. También existe en color blanco con un nivel de transparencia del 40%. Se utiliza como material retardante para el fuego, es resistente a ácidos, es fácil de colorear y reciclable.

7. Láminas de ETFE

Este material no se compone de fibras, sino que se utiliza en láminas de 50 a 250 micras de espesor, por lo que no funciona como un elemento estructural. Se utiliza como material de cierre en paneles de aire y su transparencia es del 95%. Tiene buena resistencia al fuego, la principal ventaja es su bajo peso comparado con el vidrio y la posibilidad de ser adaptable a diferentes formas. Por lo tanto, es un material ideal para aquellas soluciones que requieran alta transparencia y libertad en formas.⁶³

2.3 FIBRAS NATURALES

Se le conoce como fibra natural a un hilo o conjunto de filamentos con una sustancia muy alargada que es producida por las plantas y animales, están compuestas principalmente por celulosa y lignina, su función es darle fuerza y elasticidad a la planta.⁶⁴

Las fibras vegetales son obtenidas se las hojas, raíces, frutos, tallos y semillas de las plantas. Las fibras de hojas monocotiledonas son las llamadas “fibras duras” como lo son el henequén, el cáñamo y el yute.⁶⁵

Basándonos en la eficiencia energética, cada vez se ha buscado impulsar mas los planes de “construcciones verdes” mediante la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, el empleo de materias primas renovables en productos poliméricos y el uso de materiales reciclables para disminuir los desechos producto de actividades humanas.

⁶³ Sánchez Sierra, “Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real” (tesis de doctorado publicada, Universidad San Sebastián, San Sebastián, España, 2006)

⁶⁴ FAO, 2009 <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/> (Fecha de consulta: 26 de Octubre de 2014)

⁶⁵ González, Ana María, “Morfología de plantas vasculares” <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema12/12-5uso.htm> (Fecha de consulta: 07 de mayo de 2015)

Las fibras naturales son un recurso renovable, por ejemplo al cosechar una tonelada de fibra de yute se requiere menos del 10% de la energía utilizada en la producción de polipropileno, además las fibras naturales cuentan con emisiones neutrales de dióxido de carbono y al procesarlas se crean residuos que se puedan utilizar en materiales compuestos para construir viviendas o para generar electricidad. Por último, como ya se ha mencionado las fibras naturales son 100% biodegradables al finalizar su ciclo de vida.

Entre las ventajas que presentan las fibras naturales, denota su buena resistencia mecánica, su bajo peso y disminución en su costo. Lo anterior ha tenido éxito en la utilización de fibras naturales para la industria automotriz.

En Europa, los fabricantes de automóviles están utilizando un estimado de 80, 000 toneladas de fibras naturales al año para reforzar los paneles termoplásticos. En la India se han desarrollado láminas de materiales compuestos hechas de fibra de coco, que son más resistentes a la pudrición que la teca. Brasil está haciendo material de techumbre reforzada con sisal. En Europa, los residuos del cáñamo se utilizan en el cemento, y China usó materiales de construcción a base de cáñamo para los Juegos Olímpicos del 2008.⁶⁶

2.3.1 IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE FIBRAS NATURALES EN LA CONSTRUCCIÓN

ENERGIA:

- Plantas con capacidad de capturar energía solar y utilizar esa energía en su crecimiento y producción.

⁶⁶ FAO , 2009, <http://www.naturalfibres2009.org/es/aifn/index.html> (Fecha de consulta:26 de Octubre de 2014)

- Se requiere menos del 10-15% de la energía utilizada en la producción de otras fibras minerales o sintéticas.
- Principal impacto: Energía de transporte.

EMISIONES:

- Las plantas son captadoras de CO₂.

CICLO DE VIDA:

- Recurso renovable por excelencia.
- Fibras vegetales completamente biodegradables, al contrario que los materiales sintéticos.
- Residuos que pueden ser reciclados o reutilizados en materiales compuestos o como fuente de energía.

RESIDUOS:

- Producción de residuos sólidos, en agua y aire, menor que en materiales sintéticos. Residuos biodegradables.

RENDIMIENTO:

- Similar rendimiento y prestación que otras fibras sintéticas o minerales, pero más ligeros y reciclables.

DURABILIDAD:

- Alto grado de absorción de humedad = Importantes variaciones de peso y volumen = Baja durabilidad.

(Afectada por el ataque de microorganismos, insectos, hongos etc.)

TOXICIDAD:

- Nula o baja toxicidad en comparación con las fibras sintéticas o minerales.

SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA:

- No existe homogeneidad garantizada ni en abastecimiento, ni en propiedades
- Muy bajo costo de obtención y producción de la materia prima
- Con baja inversión, existe una transformación de sistemas de cultivos y economías rurales.
- Revalorización de economías agrícolas.

SOSTENIBILIDAD SOCIAL:

- Localización de fábricas de manufacturación de productos de base agrícola en el entorno local cercano de cosecha⁶⁷.

2.3.2 TIPOS DE FIBRAS NATURALES

2.3.2.1 FIBRA DE COCO

La fibra de coco es una materia prima para elaborar sustratos alternativa a las tradicionales que destaca por su elevada estabilidad y su capacidad de retención de agua, así como una buena aireación.

“La fibra de coco es un material muy rico en carbono C/N =100, lo que le otorga una gran resistencia a la degradación, así como una gran estabilidad.”⁶⁸

La composición del coco está integrada en un 35% de cáscara con fibra, casco o hueso en un 12%, albumen o carne en un 28% y agua en un 25%. Los porcentajes varían muy poco debido a que son dependientes del tamaño

⁶⁷ Carlos Cobrero Rodríguez, “Uso de fibras vegetales procedentes de explotaciones agrícolas en la edificación sostenible”, (tesina publicada, Universidad politécnica de Cataluña: Barcelona, España, 2009)

⁶⁸ Bures profesional, S.A., “Fibra de coco”, <http://www.grn.es/sicosa/tecnic/fibradecoco.htm>. (Fecha de consulta: 10 de febrero de 2014)

o estado de maduración del coco. La fibra de coco es un material con un aroma propio de su nombre, se caracteriza por presentar un color café después de secarse, además de poseer variedad de longitudes, en promedio tiene una longitud comprendida entre 15.0 y 25.0 cm. Es un material resistente a los impactos, compresiones y flexiones.

En la tabla 3 se pueden observar las diferentes propiedades de la fibra de coco con determinado diámetro y densidad.

FIBRA	DENSIDAD (g/cm ³)	DIAMETRO (μm)	RESISTENCIA A TENSIÓN (kg/cm ²)	MÓDULO DE YOUNG (Kg/cm ²)	ELONGACIÓN DE RUPTURA (%)
Coco	1.15-1.46	100-460	1310-2200	40,000-60,000	15-40

La fibra de coco tiene una degradación lenta ocasionada por sus

Tabla 3: Valores característicos de densidad, diámetro y propiedades mecánicas de la fibra de coco⁶⁹

contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina que son difíciles de degradar, junto con una estructura superficial cerrada que le proporciona una mejor resistencia a los ataques alcalinos y microbiológicos.

Tiene una gran resistencia a la degradación por ser un material muy rico en carbono, es completamente biodegradable.

La empresa de automóviles FORD junto con la empresa “the scotts miracle-Gro” realizó investigaciones sobre la fibra de coco para aplicarse en diferentes partes de los automóviles.

⁶⁹ Sayra Conde Rito, “Estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de palas de aerogeneradores de pequeña potencia” (Tesis de licenciatura, Oaxaca, Universidad del Itsmo, 2010)

Apostaban por que la cascara del coco pudiera servir como refuerzo a distintos materiales de plástico y además aligeraría el peso de los objetos. La fibra podría utilizarse en el interior del automóvil, tanto en puertas como en asientos. Entre las pruebas que se realizaron encontraron que la fibra de coco tiene la ventaja de que es muy resistente al fuego.⁷⁰

En la Universidad Politécnica de Valencia y de la Universidad de Sao Paulo, un grupo de investigadores han elaborado un nuevo material para fines constructivos, el material integra fibras de coco verde, cenizas de la cascarilla del arroz y pulpa de celulosa, mezcladas con cemento portland convencional.

El material fue propuesto para ser utilizado en viviendas de bajo costo y específicamente pudiera ser viable como teja, sustituyendo a la uralita. Los investigadores aseguran que es una alternativa al cemento tradicional más sustentable y barata, además con altas prestaciones mecánicas y de resistencia.⁷¹

Lo innovador del material reside en la incorporación de la fibra de coco verde, que actúa como refuerzo para la matriz del cemento y como conglomerante funciona con la mezcla de cemento con la ceniza de cascarilla de arroz; se ha conseguido que las fibras no se degraden en la mezcla con el tiempo, que es algo que ocurre cuando solamente se usa cemento, algo que explico Jordi Paya.⁷²

⁷⁰ Javier Onrubia, "TECMOVIA, tecnología y coches de nueva generación" , 2011
<http://www.tecmovia.com/2011/10/08/ford-apuesta-por-el-coco-para-construir-materiales-en-sus-coches/> (Fecha de consulta: 20 de marzo de 2014)

⁷¹ Javier Rosas, "Material de construcción con arroz y coco" 2013,
<http://www.abc.es/sociedad/20130809/abci-material-construccion-coco-arroz-201308081819.html>.
(Fecha de consulta: 12 de marzo de 2014)

⁷² Jordi Paya: Director del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia

2.3.2.2 CAÑA DE AZÚCAR

En otras investigaciones se ha determinado que las fibras naturales presentan grandes ventajas técnicas, económicas, ecológicas y ambientales. El bagazo de la caña de azúcar es un material que tiene las características para ser utilizado como refuerzo en la elaboración de materiales compuestos.

“El bagazo es definido por la sociedad internacional de técnicos de la caña de azúcar como el residuo de la trituración de la caña en uno o varios molinos”.⁷³

Cuando se fabrica azúcar, la caña utilizada lleva con ella hojas o raíces. La caña es cortada y se desmenuza en molinos de martillos de tres o más cuchillos o rotatorios, después el jugo es extraído haciendo pasar la masa por uno o varios molinos de tres rodillos. El empleo de presiones elevadas y el uso de agua sobre el material exprimido hacen posible extraer de 90 a 98% del contenido de sacarosa de la caña. De esta operación resulta un residuo fibroso que es el bagazo.

En el sector agroindustrial es necesario la utilización de desechos y residuos para producir materiales alternativos, como polímeros, en especial la producción de poliuretanos reforzados.

En una reciente investigación en el laboratorio de polímeros, POLIUNA, de la Universidad Nacional de Costa Rica, se han llevado a cabo estudios en la incorporación de melaza residual proveniente de la agroindustria de la caña de azúcar, para la obtención y caracterización de espumas de poliuretano. En este último caso, se sustituyó el polietilenglicol de forma parcial, empleando para esto la melaza. Esta investigación incluye los mejores resultados obtenidos en la preparación de dichos poliuretanos, pero además se utiliza el bagazo de la misma fuente como material para

⁷³ Vicente Hernández René, “Uso de fibras de bagazo de caña en concreto”, (tesis de maestría publicada Universidad Veracruzana: Xalapa, Veracruz, 2008)

refuerzo.⁷⁴

En otra investigación, el Instituto Politécnico Nacional ha estudiado el bagazo de la caña para hacer concreto hidráulico, su objetivo fue reducir el contenido de cemento en el concreto para poder reemplazarlo por subproductos industriales, como lo son la ceniza volante, desechos agrícolas y la ceniza del bagazo de caña.

El Dr. Pedro Montes García, quien estuvo a cargo de la investigación explicó lo siguiente: “En la composición química de la ceniza de bagazo de caña predomina el óxido de silicio con contenidos de alúmina y óxido de hierro, que pueden reaccionar con el hidróxido de calcio en la hidratación del cemento y producir materiales que mejoren las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto”.

El material fue empleado a nivel laboratorio para sustituir de manera parcial al cemento Portland, dicho material ya puede ser utilizado, pero aun se continuarían realizando pruebas, por el momento se recomendó no rebasar el 15% de sustitución de cemento Portland por ceniza de bagazo de caña de azúcar. La razón es que actualmente no se cuenta con un adecuado control del sistema de calcinación del bagazo; por lo tanto, la ceniza tiene un alto contenido de materia sin calcinar, la cual puede afectar de manera negativa las propiedades finales del concreto.

La ceniza de bagazo de caña parece ser una opción factible para la elaboración de una gran variedad de materiales que se utilizan en la industria de la construcción. Por ello se requiere continuar con investigaciones que puedan aclarar su potencial como sustituto parcial o total del cemento Portland.⁷⁵

⁷⁴ José Vega-Baudrit, Materiales poliméricos compuestos a partir de residuos generados por la agroindustria de la caña de azúcar, *Revista iberoamericana de polímeros*, Vol. 9, 2008

⁷⁵ La Jornada, “ Bagazo de caña”,2014 <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/02/06/bagazo-de-cana-posible-componente-de-concreto-hidraulico-4963.html> (Fecha de consulta: 13 de marzo de 2014)

2.3.2.3 EL CAÑAMO

El cáñamo es la fibra que se obtiene de las variedades de la planta *Cannabis sativa*. A partir de esta fibra se elaboran gran cantidad de productos comerciales entre ellos elementos para la construcción.

Se han descubierto yacimientos de textil de cáñamo del 2800 a.C. en China y en el S. XVII se utilizaba para el velamen de los barcos.

Es una fibra natural en la cual destacan sus propiedades térmicas, ya que tiene una conductividad de $0.041 \text{ W/m}^{\circ}\text{k}$, en cuanto a sus propiedades acústicas, tiene una absorción de 0.7 y tiene buen amortiguamiento ya que las temperaturas interiores disminuyen al atravesar el material.

Se estima que el cáñamo produce casi 3 veces más fibra por hectárea que el algodón y 6 veces más que el lino. No requiere de productos químicos, por lo tanto es un material libre de sustancias tóxicas que deterioren la salud. También posee cierto nivel de regulación de humedad, por ser altamente poroso. Como es una fibra con bastante lignina y sin constitución proteica, los insectos y otros pequeños invertebrados no presentan alguna amenaza.

La fibra de cáñamo es un material reciclable, incluso tras la demolición de un edificio, puede molerse y ser reutilizado para la producción de bloques de fibra o morteros aislantes.

Durante su producción no necesita ser fumigada ni se fomenta el uso de abonos químicos, ya que no contiene proteínas (por la ausencia de nutrientes en su tallo). Retiene CO₂ durante todo su ciclo de vida útil, con ello se consiguen edificios con valores de emisión de CO₂ neutros o bien negativos.

Las variedades industriales de cáñamo son completamente legales (en gran parte de Europa) ya que poseen un muy bajo índice de THC (sustancia alucinógena), presente exclusivamente en la flor y hojas altas, no en el tallo.⁷⁶

Existe una empresa española llamada Cannabric, que se dedica a la producción de materiales constructivos a base de cáñamo. Según sus estudios, los productos de cáñamo presentan valores negativos de GWP (Global Warming Potential) (-0,624 kg CO₂eq/kg), teniendo en cuenta todo el proceso de fabricación y posible transporte del material.

Con las fibras de cáñamo, se obtiene una gran variedad de productos para fines constructivos. El producto más común derivado de estas fibras son las mantas de cáñamo; entre otros materiales también se encuentran morteros aislantes de cal y cáñamo, lana de cáñamo a granel o tableros rígidos aislantes.

Uno de los países que más viviendas ha aislado en el mundo usando mantas de fibras ha sido Alemania. Por otra parte, en Canadá, Reino Unido y Francia el cáñamo se ha hecho presente de forma significativa, hay una fuerte conciencia medioambiental y apoyan la producción de este producto limpio y ecológico.

A continuación se mencionan algunos productos constructivos a base de fibra de cáñamo:

- **FIELTRO DE CAÑAMO EN ROLLO O BANDAS:**

El fieltro de este material está compuesto por 75% de fibra de cáñamo y 25% de yute reciclada.

⁷⁶ Helena Rodríguez Galvez, "Aislamientos naturales y productos industriales de cáñamo", <http://www.mimbrea.com/guia-practica/aislamientos-naturales-i-productos-industriales-de-canamo>. (Fecha de consulta: 01 de marzo de 2014)

En la figura 17 se observa un rollo hecho con fieltro de cáñamo, también se utiliza en bandas y en el caso de los rollos, se coloca debajo de una tarima de madera flotante y sirve como aislante debajo del suelo, además funciona contra los ruidos aéreos y de impacto y si es colocado encima de un tablero de madera en los techos, permite la ventilación.



Figura 17: Fielto de cáñamo⁷⁷

En la presentación en bandas se utiliza como junta de dilatación, como amortiguador encima de vigas de madera y como separador aislante entre muros y solera. Tiene una densidad de 750 g/m², un espesor de 5 mm y es elástico.⁷⁸

- **BLOQUE AISLANTE MACIZO DE CAÑAMO:**

El bloque de cáñamo (Figura 18) es empleado en la construcción, presenta cualidades bioclimáticas, está conformado por cáñamo, tierras selectas, aglomerantes y conglomerantes naturales.

⁷⁷CANNABRIC, http://www.cannabric.com/catalogo/fielto_de_canamo_en_rollo/ (Fecha de consulta: 17 de marzo de 2014)

⁷⁸ CANNABRIC, "Ficha técnica del Cannabric", 2014
http://www.cannabric.com/media/documentos/564f4_CANNABRIC_ficha_tecnica_y_ensayos.pdf.
(Fecha de consulta: 17 de marzo de 2014)

Funciona como muro de carga monocapa y muros de división interior, es un bloque autosuficiente ya que no requiere de aislamiento térmico o acústico adicional y tiene una elevada inercia térmica.

Se pueden utilizar aproximadamente 10 toneladas de cáñamo para una vivienda de 100 m², es decir, 100 Kg. de cáñamo por cada M² construido y así se reemplazan los materiales que agreden el medio ambiente.

Los componentes minerales del bloque proporcionan resistencia mecánica, densidad y una elevada inercia térmica. El bloque tiene una baja conductividad térmica de 0.19 W/m.k, sus cualidades termodinámicas protegen del frío y del calor.⁸⁰



Figura 18: Bloque de cáñamo⁷⁹

Hasta este punto, se ha demostrado que la fibra de cáñamo puede ser utilizada para fines constructivos, ya sea como bloque, paneles prefabricados o como aislante y además se ha comprobado que no excede los límites recomendados como fibra alucinógena, es decir que no presenta daños a la salud.

2.3.2.4 FIBRA DE HENEQUÉN

El henequén proviene de una planta monocotiledónea, del género de los agaves, perteneciente a la familia de las *Agavaceae*. Es originario de

⁷⁹ CANNABRIC,
http://www.cannabric.com/catalogo/cannabric_bloque_aislante_de_canamo_estructural_/ (Fecha de consulta: 17 de marzo de 2014)

⁸⁰ CANNABRIC "Ficha técnica de materiales",
http://www.cannabric.com/media/documentos/570c4_TECHNIFEUTRE_ficha_tecnica.pdf (Fecha de consulta: 17 de marzo de 2014)

Yucatán. Fue domesticado en la época prehispánica por los mayas, debido a la utilidad de sus fibras.

Se usa principalmente la fibra de las hojas que se procesan especialmente para fabricar cuerdas, cordeles, sacos, telas y tapetes. La mejor calidad está en función de la longitud, resistencia y color de la fibra.

Recientes investigaciones han demostrando que, frente a las fibras sintéticas, la fibra del henequén es más resistente, soporta una gran cantidad de carga durante mayor tiempo y conserva mejor los productos que se transportan en costales hechos con esta fibra. Además, de su pulpa se extraen esteroides para la industria farmacéutica.

En Estados Unidos se utiliza para la fabricación de cuerdas marinas debido a su alta resistencia a la salinidad.

Las fibras del henequén se componen de hebras de 60-160 cm de largo por 1/8 a 1/2 mm de diámetro, angulares o casi cilíndricas y más gruesas en la base. Cada hebra consiste en un haz fibrovascular o comúnmente de dos haces los que a su vez están compuestos de infinidad de células largas de tabiques gruesos, que presentan una longitud de 25 mm y de 10-30 micrones de diámetro.

Otros usos de la fibra de henequén son los siguientes:

- Para reforzar las placas de yeso, lo cual las hace más fuertes y resistentes, además, proporcionan excelentes resultados en las correcciones sonoras de las habitaciones destinadas a la música
- Mezcla con fibra de vidrio para paneles de relleno utilizable a escala mundial para la confección de viviendas de urgencia en caso de catástrofes naturales
- Para recubrimiento de pisos, objetos de artesanía, cordeles de usos especiales recubiertos de plásticos y sacos para envasar todo tipo de producto.

La resistencia de la fibra está dada por el área seccional de la pared celular (célula de la fibra), la cual es proporcional al diámetro de la fibra y al grosor de la pared. Para medir la resistencia a la tensión de una muestra se siguen diferentes métodos: uno se basa en la ruptura de hilos individuales o haces, y otros la expresan como libras o gramos por unidades de peso de la fibra examinada.

Otro parámetro que debe tomarse en cuenta es la finura de la fibra, esta se expresa de diversas formas: algunos la expresan en número de pies por libra o el promedio de números de metros por gramos de fibra, mientras que otros lo hacen mediante la relación de la longitud y el espesor de la fibra. Esta relación debe ser alta, pues la fibra que se utiliza para fines de hilandería tiene que ser mucho más larga que gruesa.

En la tabla 4 se expresan las clases y parámetros de calidad de la fibra vigentes que se deben de considerar para determinar la calidad de la fibra de henequén analizada.

Clases de calidad	porcentaje de manchas	porcentaje impurezas	longitud (cm)	humedad
1	4	< 6%	> 90 cm	< 12%
2	10	< 6%	75-90 cm	< 12%
3	15	< 6%	60-75 cm	< 12%
4	> 15	< 6%	< 60 cm	< 12%

Tabla 4: Clases y parámetros de calidad de la fibra de henequén⁸¹

2.3.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS FIBRAS DE HENEQUÉN

Una fibra de henequén se compone de celulosa, (59%) hemicelulosa (28%) y lignina (8%) la disposición general de estos componentes dentro de

⁸¹ Roberto Otero Baña, "El cultivo del henequén como planta textil y su aprovechamiento integral", <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/e0923.pdf> (Fecha de consulta: 22 de agosto de 2014)

la fibra, como en otras fibras duras naturales, es de tal manera que la lignina actúa como una matriz cementante para la celulosa de las fibras, las cuales tienen su propia estructura por separado. La celulosa conforma la parte rígida de la fibra, debido a esto la rigidez y resistencia de una fibra es a consecuencia de dicha disposición estructural.

Algunos de los factores que intervienen en las propiedades de una fibra son las condiciones climáticas, la edad de la planta, el tipo de suelo y el método de extracción.⁸²

Estos factores conllevan hacia afectaciones en la composición química, estructura y variaciones físicas de la fibra.

La medición de las propiedades de las fibras naturales tiene una forma diferente de abordaje en relación con los materiales clásicos, ya que dependen de factores climáticos como son la temperatura y humedad y por otra parte dependen del tiempo de la prueba y la velocidad de deformación.

Factores que afectan una prueba a tensión:

1. Influencia del diámetro

La relación de esfuerzo-deformación es independiente de las dimensiones del espécimen para cualquier material convencional, sin embargo con las fibras naturales no sucede lo mismo, la medición del diámetro y la longitud se ve reflejada en lo inestable de su morfología. La variación del diámetro influye en las propiedades mecánicas a tensión de fibra a fibra y a lo largo de la misma.

En otras investigaciones ha habido una variabilidad en cuanto a la evaluación de la resistencia a tensión de fibras naturales, un ejemplo

⁸² Gonzalez Murillo, Ansell, "mechanical properties of henequen fibre/epoxy resin composites" *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 45, No. 4, 2009

de ellas es una investigación sobre la fibra de coco⁸³, en la cual se observó que con el incremento del diámetro la resistencia a tensión y el módulo de elasticidad disminuye.

Sin embargo, Kulkami⁸⁴ y su equipo de investigación, realizaron pruebas a tensión a una fibra de coco de igual forma, pero las fibras eran de origen Hindú, los resultados fueron los siguientes: con el incremento del diámetro, la resistencia última a tensión incrementó.

La diferencia de resultados en estas investigaciones es debido a la madurez de la fibra, su composición química y las condiciones de la prueba, como se vio con anterioridad.

2. Influencia de la longitud

La resistencia última a deformación y el porcentaje de deformación a la rotura disminuyen con el aumento de longitud en una investigación realizada empleando fibra de coco⁸⁵ en cambio, el módulo de elasticidad aumenta con el incremento de la longitud en la fibra.

3. Forma de la sección transversal

Como ya se ha visto, las fibras naturales se presentan en una gran diversidad tomando diferentes



Figura 19: Variaciones en la sección transversal de una fibra de henequén.

⁸³ Tomczak Fabio, "Estudios sobre a estrutura e propiedades de fibras de coco e curauá do Brasil" (tesis de doctorado en ingeniería y ciencia de los materiales, Universidad Federal de Paraná, 2010)

⁸⁴ Kulkami, A.G. Satyanarayana, K.G. Sukumaran, K. Rohatgi, P.K. "Mechanical behavior of coir fibres under tensile load" Journal of materials science, 16 (4)

⁸⁵ Tomczak Fabio, "Estudios sobre a estrutura e propiedades de fibras de coco e curauá do Brasil" (tesis de doctorado en ingeniería y ciencia de los materiales, Universidad Federal de Paraná, 2010)

formas estructurales en su sección transversal.

En el caso de las fibras de henequén, estas presentan un cambio en la sección a lo largo de la longitud de la fibra, como se puede observar en la figura 19.

En la base se observa una forma renal (A) que conlleva a la sección media, cambiando su forma a una elíptica (B) y al final muestra una forma que asemeja un círculo(C).⁸⁶

En una investigación sobre la influencia de la estructura de una tela de henequén en cuanto a las propiedades mecánicas en un compuesto polimérico⁸⁷ se ha analizado el efecto de los tejidos con fibras de henequén (Figura 20) probando la cantidad y el apilamiento de dos tejidos diferentes de henequén en cuanto al comportamiento mecánico de la composición henequén/epoxi.

Se observó que las propiedades a tensión y flexión de los materiales compuestos mejoran al utilizar una tela tejida modificada lo que atribuyó a aumentar la adherencia entre la fibra-matriz en los nudos de la fibra del tejido experimental proporcionando un anclaje mecánico del nudo con la matriz creando una fuerte unión que impide el deslizamiento de la fibra, por lo tanto se prueba que es posible mejorar las propiedades mecánicas de un compuesto polimérico.

⁸⁶ Cazaurang-Martinez M.N., Herrera-Franco P. J., Gonzalez-Chi P.I., Aguilar-Vega M. "Physical and mechanical properties of henequén fibers" Centro de investigación científica de Yucatán. 1990

⁸⁷ Sampieri-Bulbarela, Manzano-Ramirez A., Reyes-Araiza J. L., Muñiz Villareal M. S., Gasca'Tirado j.R., Apátiga L.M., Savastano H., Marroquín de Jesús A. "Influences of a novel henequén fabric structure on the mechanical properties of a polymeric composite" Scientific research and essays Vol. 6 (25) 2011

Los mecanismos de falla de un compuesto textil reforzado dependen del tipo de textil que puede ser tejido, trenzado y cosido y del estilo de tejido (tafetán, sarga y raso)

Durante la prueba a tensión se observó que la resistencia a tensión y modulo elástico de los especímenes reforzados con uno y nueve capas de tejido no modificado obtuvieron valores más bajos comparados con los especímenes con refuerzo.

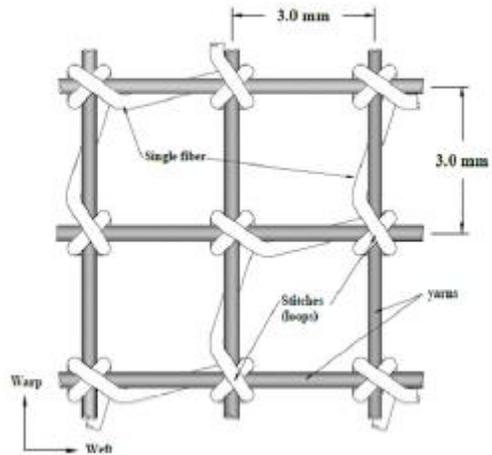


Figura 20: Tela de henequén con refuerzo

Basándose en los resultados a tensión está claro que las propiedades se influyen principalmente por la estructura del tejido de la tela y no tanto por el agregado químico que se le añade a una fibra.

El tratamiento químico que se le dio a las fibras sirvió para protegerla contra la degradación y mejoró la adherencia entre la fibra de henequén y la matriz epoxi. Sin embargo, la comparación de las propiedades mecánicas de las muestras con ambos tipos de tejido (modificado y no modificado) se comprobó que los nudos de refuerzo del tejido contribuyó en gran medida el aumento de las adherencias mecánicas.

En otra investigación en la cual se evalúa la resistencia a tensión de fibras de henequén condicionadas a la prueba en 3 secciones de la misma fibra (renal, elíptica y circular) en la base, parte media y al final de la fibra (Figura 21). En cuanto a la resistencia a tensión y modulo de Young se observó que

la parte media (elíptica) y la circular (final) son parecidas una a la otra, en cambio en la parte renal (en la base) muestra valores más bajos⁸⁸.

Esta diferencia puede atribuirse a una diferencia en la orientación angular de las fibras en cada sección con respecto a la carga aplicada.

En el caso de las fibras de sisal, lo pequeño del ángulo espiral de las microfibrillas en la pared secundaria de las células de la planta es lo que le da mayor resistencia a la fibra.

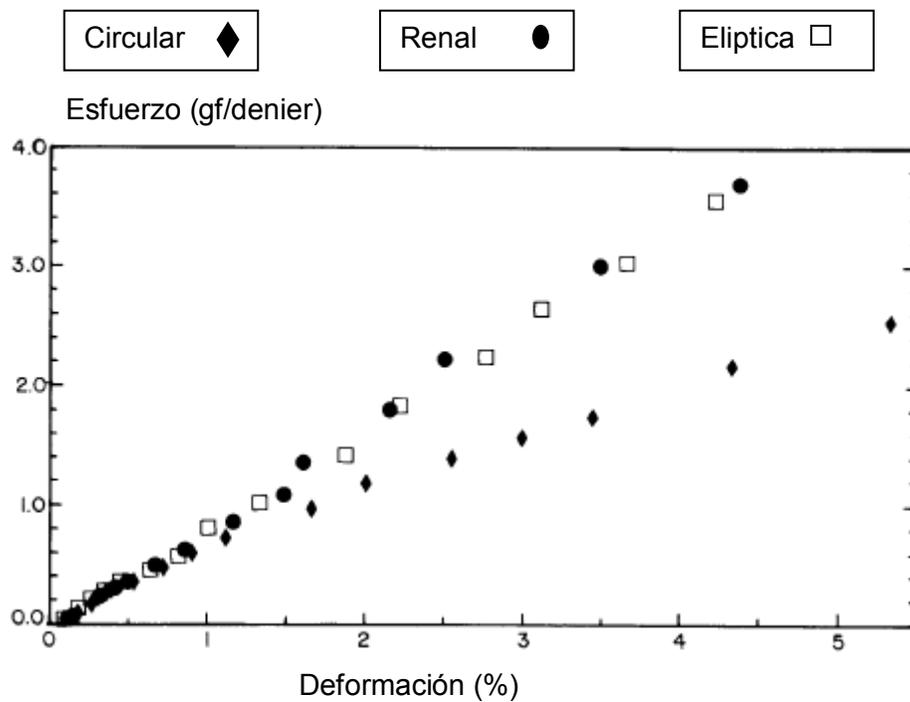


Figura 21: Curvas esfuerzo-deformación para diferentes secciones de fibra de henequén

Se ha planteado que un tratamiento químico, es el método clave que puede mejorar las propiedades mecánicas de las fibras.

⁸⁸ Cazaurang-Martinez M.N., Herrera-Franco P. J., Gonzalez-Chi P.I., Aguilar-Vega M. "Physical and mechanical properties of henequén fibers" Centro de investigación científica de Yucatán. 1990

En una investigación en la cual se intentó probar lo anterior, se le realizó una prueba a tensión a una fibra tratada, inmersa en NaOH (Hidróxido de sodio) y agua destilada, con lo cual se observó microscópicamente (Figura 22) que el tratamiento químico removía los restos en la superficie de la fibra y se revelaba su estructura celular⁸⁹.

Para los especímenes de fibras de henequén no tratados, el promedio de resistencia a tensión resulto ser de 2340 Kg/cm² y una deformación de 1.7% y un módulo de Young de 150,000 Kg/cm², mientras que para las fibras tratadas la resistencia a tensión fue de 2330 Kg/cm², deformación de 0.9% y modulo de Young de 170,000 Kg/cm².

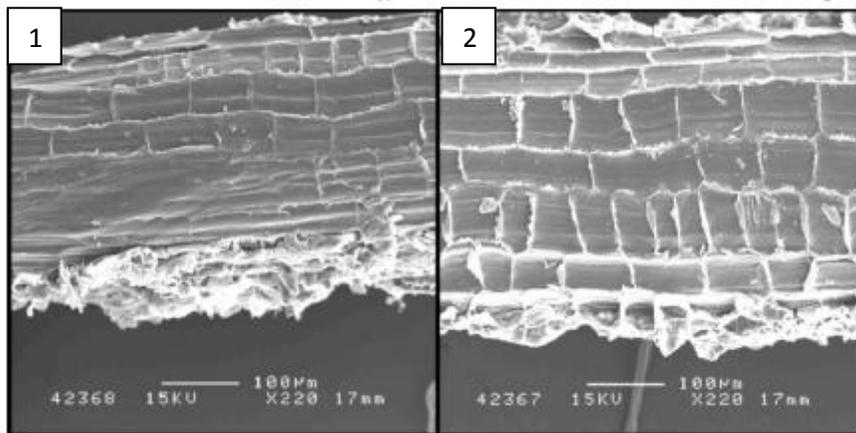


Figura 22: Imágenes microscópicas de una fibra sin tratamiento (1) y otra con tratamiento de NaOH (2)

Las fibras inmersas en NaOH y posteriormente lavadas con agua destilada para eliminar el NaOH y secadas a 60° C durante 24 horas, presentan una disminución del 20% de su resistencia tensión aproximadamente.

⁸⁹ Gonzalez Murillo, Ansell, “mechanical properties of henequen fibre/epoxy resin composites” Mechanics of Composite Materials, Vol. 45, No. 4, 2009

Se concluyó que los resultados experimentales para ambos tipos de composición son similares, sin embargo el tratamiento químico no mejora las propiedades a tensión.

Como ya se ha visto con anterioridad, los resultados en una prueba a tensión de una fibra de henequén se ven influenciados por las propiedades cambiantes a lo largo de una fibra, tomando en cuenta que las siguientes propiedades mecánicas se realizaron con la sección central de la fibra, los resultados fueron los siguientes: (Tabla 5)⁹⁰

Diámetro (um)	Resistencia a tensión (kg/cm ²)	Módulo elástico (Kg/cm ²)	Deformación a la ruptura (%)
180	6000	120,000	4.0-6.6

Tabla 5: Propiedades mecánicas de la fibra de henequén (Agave fourcroydes)

2.3.4 PUENTE CON FIBRAS NATURALES

El puente q'eswachaka o qeshuachaca (Figura 23) es un puente colgante de fibra vegetal (ichu) y se encuentra situado sobre el río Apurímac en el distrito de Quehue, en la región Cusco Perú.

La existencia de este puente data desde la época incaica y su mantenimiento y renovación se realiza mediante un rito ejecutado por las comunidades de Winch'iri, Chaupibanda, Ccollana Quehue y Perqaro.⁹¹

⁹⁰ Luis Felipe Carrillo Lara, "Modificación de las propiedades interfaciales en materiales compuestos polietileno de alta densidad-fibra de henequén" Universidad Autónoma Metropolitana, 1998

⁹¹ Wikipedia, "Puente Q'eswachaca" http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_Q'eswachaca, (Fecha de consulta: 22 de marzo de 2014)

El puente tiene una longitud de 28 metros de largo y 1.20 metros de ancho, su estructura es hecha de “ichu” trenzado.

Q’eswachaka es renovado una vez por año en una especie de celebración que dura 4 días y las comunidades se unen para cambiar las sogas deterioradas por otras nuevas. El mantenimiento al puente se realiza con ichu, un pasto natural que abunda en las altiplanicies andinas, las mujeres se dedican a tejer los entrelazados de fibras, después desechan los entrelazados que no funcionan en el puente para ser sustituidos, por último hacen los amarres con cordones de ichu, maguey o trozos de cuero.



Figura 23: Puente Q’eswachaka.⁹²

La construcción de este puente y el mantenimiento que actualmente se le da, es una prueba más que las fibras naturales son una respuesta viable y eficiente para ser utilizada con fines arquitectónicos. Se ha sabido que el

⁹²Carmen Arrospide Poblete, “El puente inca de Q’eswachaca”
<http://blogdemarcosicha.blogspot.mx/2012/09/el-puente-inca-de-queswachaka.html>

puede haber estado en pie por cientos de años y ha resistido al viento, al tránsito de personas, lluvias y otros fenómenos naturales.

2.3.5 PRODUCCIÓN DE FIBRAS NATURALES

El Henequén se cultiva como fibra en Brasil, China, Cuba, Kenia, Haití, Madagascar y México. Los mayores productores son Brasil (120,000 toneladas), Tanzania(30,000) y Kenia (25,000). Brasil exporta alrededor de 100,000 toneladas de fibra cruda y productos manufacturados; particularmente de sogas a los Estados Unidos de América. Kenia exporta cerca de 20,000 toneladas y Tanzania 15, 000 toneladas.⁹³

En México la producción anual agrícola de henequén durante el 2013 fue la siguiente:

Ubicación	Superficie sembrada (Ha)	Superficie cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Precio medio rural (\$/Ton)	Valor de producción
Yucatán	9,523.35	7,471.62	3,918.14	0.52	6,818.16	26,714.4

Tabla 6: Producción anual de henequén en México durante el 2013⁹⁴

⁹³ FAO, 2009, <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/sisal.html> (Fecha de consulta: 26 de Octubre de 2014)

⁹⁴SAGARPA, 2014 <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> (Fecha de consulta: 26 de Octubre de 2014)

Como se observa en la tabla 6, el valor de producción del henequén es muy bajo, por lo cual el costo no resultaría un inconveniente si se pretendiera utilizar esta fibra en la construcción de cubiertas tensadas.

En cuanto a la producción del cáñamo, el mayor productor es China, seguido por Europa, Chile y la república popular democrática de Corea. En la Unión Europea el cáñamo es cultivado en alrededor de 15, 000 hectáreas de tierra. Los mayores productores son Francia, Alemania y el Reino Unido.

La legislación de México impide toda actividad ligada a la producción y transformación del cáñamo industrial, pese a que acuerdos que mantiene con otros países, como el Tratado de Libre Comercio de América del Norte, vigente desde 1994 con Canadá y Estados Unidos, y el firmado con la Unión Europea, permiten el intercambio de varios de sus derivados. En México se tolera la importación de semillas, cáñamo en bruto, textiles, hilos y fibra para la elaboración de cuerdas.⁹⁵

Por otro lado, la fibra de coco es en mayor parte desechada, solo se emplea el agua y el fruto en sí en el comercio alimenticio.

2.4 TIPOS DE TEJIDO

2.4.1 CROCHET

El crochet es una técnica de tejido en la cual una tela de fondo es tensada y estirada en un marco o bastidor. El hilo de la labor, se sostiene por debajo de la tela y por consiguiente se inserta una aguja con un gancho hacia abajo y se hace una lazada a través de la tela, de esta manera y con el lazo aun en el gancho, este se inserta un poco hacia adelante y con otra lazada de hilo

⁹⁵ Emilio Godoy, <http://www.ipsnoticias.net/2013/08/la-ignorada-faceta-productiva-del-cannabis/>
(Fecha de consulta: 28 de octubre de 2014)

se elabora un punto y se trabaja a través de la primer lazada para formar un punto cadena.⁹⁶

A propósito, mencionando esta técnica de tejido, una artista japonesa llamada Toshiko Horiuchi, realiza un trabajo muy interesante al construir estructuras de red textiles (Figura 24) hechas a mano, empleando el crochet e hilo de nylon⁹⁷.



Figura 24: Estructura tensada de recreación para niños

Para realizar sus proyectos se inspira en la obra de Gaudí y en las mezquitas iraníes, en particular se dedica a hacer estructuras tensadas que parecen flotar a las que llama “patios de recreos para niños” estos textiles

⁹⁶ Carina Molina, “A la moda crochet” <http://www.crochet.com.ar/historia.html> (Fecha de consulta: 10 de mayo de 2015)

⁹⁷ Argentina Velasco, “Toshiko Horiuchi MacAdam y su obra textil” <http://blog.habita.la/2014/05/toshiko-horiuchi-macadam-y-su-obra-textil/> (Fecha de consulta: 10 de mayo de 2015)

son capaces de soportar cargas humanas en las cuales se puede brincar y correr.

Como se observa en la figura 24, dichas estructuras se anclan mediante tensores a los muros de un recinto, empleando placas de acero estructurales para su fijación, al final se coloca una red vertical que se sujeta al techo mediante armaduras.

A partir del éxito de Horiuchi con sus estructuras tensadas, se presenta factible el realizar cubiertas de este tipo con textiles y empleando tejidos para conformar las redes.

2.4.2 TELAS ORBICULARES

Las telas orbiculares son un tipo de tejido realizado por una araña para construir su tela y lo hace de la siguiente manera:

Para empezar a trabajar, primeramente la araña orbicular se posa y emite un hilo que el viento llevara hasta un obstáculo próximo. Resulta un eje de partida más o menos de curva, por el que la araña se encamina: cuando llega al punto más bajo de este “cable destensado” la araña fija un hilo y se deja caer soltándolo hasta que encuentra un obstáculo debajo. Resulta de esta operación una estructura en forma de “Y” que es el punto de partida de la clásica tela de araña. El centro de la “Y” será el centro de la tela, los tres primeros radios constituirán las líneas de partida y el animal empezara ahora a disponer las siguientes.

La distancia entre los hilos es constante en cada especie, y por consiguiente el número total de hilos también. La araña dispone sus hilos partiendo del centro, alternando entre los tres lados de la “Y” inicial para no terminar un lado antes que el otro, lo que desequilibraría la construcción por la tensión de los hilos. Por otra parte, sitúa los hilos partiendo del centro y parece medir con sus patas previamente la distancia entre los hilos ya construidos, así como su tensión, para saber donde lanzar la siguiente.

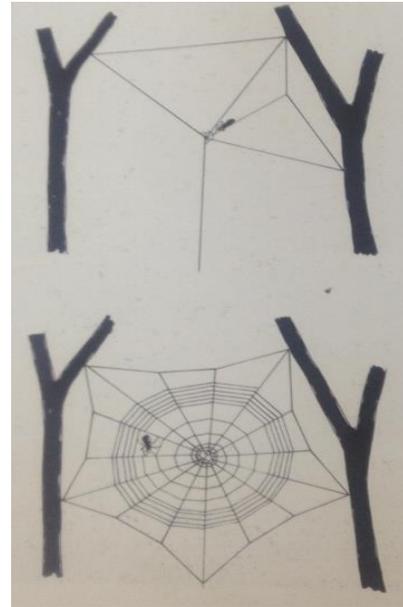


Figura 25: Construcción de la red de una araña⁹⁸

Una vez el marco y los hilos están colocados, la araña sale del centro de la tela y empieza un trayecto en espiral hacia el exterior, (Figura 25) en el transcurso del cual deposita la llamada espiral provisional. Se trata de un hilo no pegajoso que tiene como función constituir una infraestructura solida que estará acabada cuando la araña haya llegado al extremo de los hilos. Llegado este momento, la araña da media vuelta y empieza a colocar la tela pegajosa, o rizada en las especies cribeladas. Se debe tomar en cuenta que solamente los hilos en forma de circunferencia son adhesivos, los hilos radiales carecen de esta sustancia.⁹⁹ A medida que la araña progresa, destruye la espiral primaria, que ya no sirve para nada (la araña se come esta tela) y la sustituye por la espiral definitiva, destinada a capturar las presas; por este motivo recibe el nombre de espiral capturadora.

⁹⁸ Horst Berger, *Light structures*,(Berlín: Birkhauser Verlag, 1996)

⁹⁹ Borja M. “Destejendo el mundo, ciencia, asombro y pensamiento crítico”06 de febrero de 2012, <http://www.destejendoelmundo.net/2012/02/tela-de-arana.html> (Fecha de consulta: 06 de octubre de 2013)

Esta última espiral no llega hasta el centro ya que la araña deja una zona que no está pegajosa en el centro de su tela, donde generalmente se coloca, por lo que la sustancia pegajosa no sería de ninguna utilidad. De esta forma la zona central se sostiene gracias a la espiral primaria. La araña también deja, normalmente una zona de hilos muy separados entre sí para poder pasar de un lado a otro de la tela con facilidad. La araña nunca se queda atrapada en su propia tela debido a que las células epidérmicas en sus patas secretan un líquido graso que impide que se adhieran. Además, puede caminar perfectamente sobre la tela gracias a las garras terminales con que están equipadas sus extremidades para asirse fuertemente al hilo en sus desplazamientos.¹⁰⁰

Este proceso de construcción dura como máximo una hora sin ningún tipo de vacilación, ya que está inscrito con precisión en los genes de la araña. Una tela circular puede contener 20 metros de seda. Cada hebra tiene un grosor de milésimas de centímetro. La tela es muy ligera, pero puede sostener hasta 4,000 veces su propio peso.¹⁰¹

2.4.2.1 USO DE LA GEOMETRIA DE LA TELA DE ARAÑA

Horst Berger, fue ingeniero de estructuras y diseñador, conocido por su trabajo con el peso ligero de las estructuras a tensión, en 1972 se le pidió diseñar 4 grandes cubiertas para unas tiendas en un parque de atracciones, cada una de las estructuras eran iguales y tenían 21.4 metros por cada lado.

Realizó un experimento en el cual mediante un pequeño modelo de cartón con 4 paredes conectaba una costilla curva al centro de cada una de ellas inclinándola hacia el interior. Debía formar bordes de tela en las cuatro paredes con forma hiperbólica para cubrir las tiendas.

¹⁰⁰ Yves Masiac, *Las arañas*, (Editorial Vecchi, S.A. 1996)

¹⁰¹ Lionel Bender, *Biblioteca de la fauna asombrosa, Arañas*, tomo 3,(México D.F: Fernández editores, 1994)

Redujo la estructura con una combinación de 4 puntos estructurales, el más simple de los elementos en las tensoestructuras. En su experimento, al estirar una malla sobre el modelo de cartón, encontró que la tela nunca tocó las 4 costillas, así se demostraba que esta forma en la cubierta era muy flexible y no eran necesarias las costillas.

Finalmente llegó a la conclusión de hacer un plan de geometría radial, (Figura 26) basándose en la tela de araña, en la red resultante, las líneas radiales representaban los cables radiales. Estos eran directos en la disposición de los planos, espaciados y con ángulos de 15° , las líneas del anillo central, localizadas sobre los planos horizontales, representaban la tela estirada entre los cables radiales. (Figura 27)

Un mástil empujaba el centro de la red hacia arriba, lo que le daba la forma tridimensional, una similitud básica que presenta la forma de la tela de araña.¹⁰²

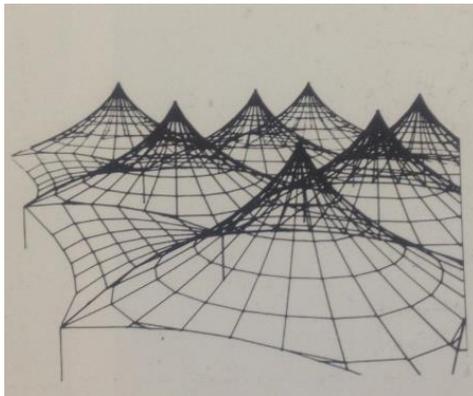


Figura 26: Cubierta circular: todos los anillos radiales son los mismos¹⁰³

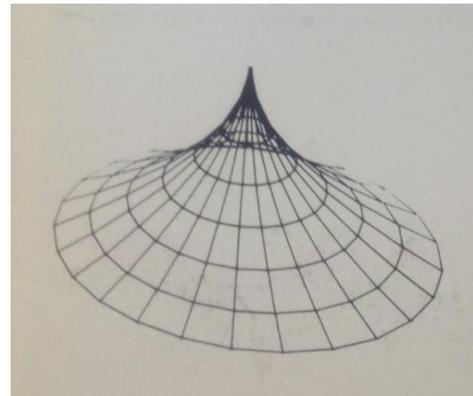


Figura 27: Tensión radial como módulo principal

¹⁰² Berger, *Light structures*, (Berlín: Birkhauser Verlag, 1996)

¹⁰³ Horst Berger, *Light structures*, (Berlín: Birkhauser Verlag, 1996)

En la figura 28 y 29 se observan dos diagramas en planta de geometría radial, presentes en un modelo inspirado en las telas de araña.

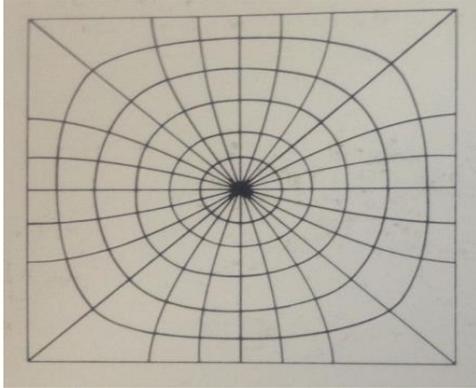


Figura 28: Líneas ortogonales tensadas

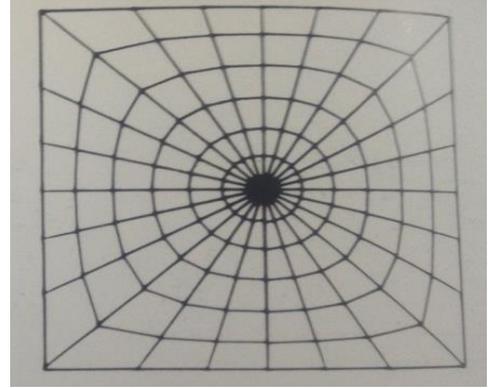


Figura 29: Diagrama de una cubierta radial

En algún punto de los nodos de la red, las fuerzas internas actúan entre la línea del anillo y la línea radial y se encontrará con un nodo (Figura 30) moviendo el nodo en la dirección de las fuerzas internas disminuirá una fuerza e incrementará otra; moviendo el nodo hasta las 2 fuerzas cancelándose el uno al otro resultará una correcta geometría del nodo.

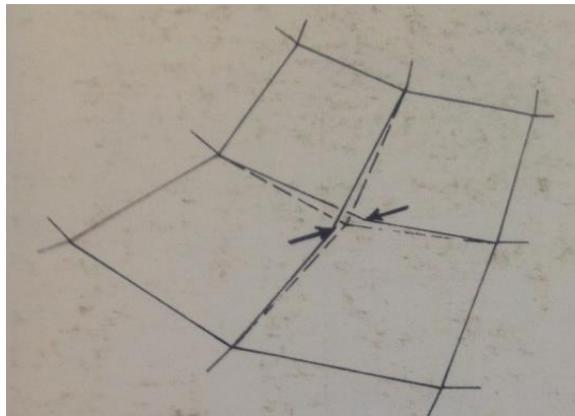


Figura 30: Deslizamiento del nodo¹⁰⁴

¹⁰⁴ Horst Berger, *Light structures*, (Berlín: Birkhauser Verlag, 1996)

2.4.3 TEJIDO DE PUNTO

El tejido de punto se divide en dos variantes:

-Por trama:

En este tipo de tejido, la dirección general de todos o de la mayor parte de los hilos que forman sus mallas, es horizontal (al menos hay un hilo que se entrelaza con el mismo) formando líneas en el tejido horizontales.

-Por urdimbre:

Es cuando la dirección general que siguen todos y la mayor parte de los hilos que forman las mallas es vertical, es una serie de hilos paralelos que se pueden entrelazar con ellos mismos.

La principal característica que presenta un tejido de punto es su elasticidad, en el caso de los tejidos planos debido a su estructura básica no pueden estirarse más allá de lo que permiten sus hilos tanto en el sentido vertical como en el horizontal, es por ello que se recurre al agregado de elastómeros cuando se requiere elasticidad.¹⁰⁵

Sin embargo, los tejidos de punto funcionan de manera diferente ya que sus mallas pueden agrandarse a costa de las entretallas y de su anchura si es estirado en sentido vertical, y aumentar su tamaño en sentido horizontal si la tensión es aplicada en este sentido achatándose las mallas.

En la figura 31 se observa un tejido de punto estirado verticalmente en los sentidos de las flechas (1) el cual puede alargarse a costa de su anchura, cuando termina la tensión, este regresa a su tamaño y forma originales. Por otra parte el tejido de punto estirado horizontalmente (2) aumenta su anchura

¹⁰⁵ Silvia Baretto, "Estructura del tejido de punto"

<http://cursos.fadu.uba.ar/apuntes/Indumentaria%20I/unidad%20practica%20n%20%201/6%20a-%20Estructura%20del%20tejido%20de%20punto-%20primera%20parte.pdf> (Fecha de consulta: 10 de mayo de 2015)

a costa de su altura y de igual forma, regresa a su forma original cuando termina la tensión.

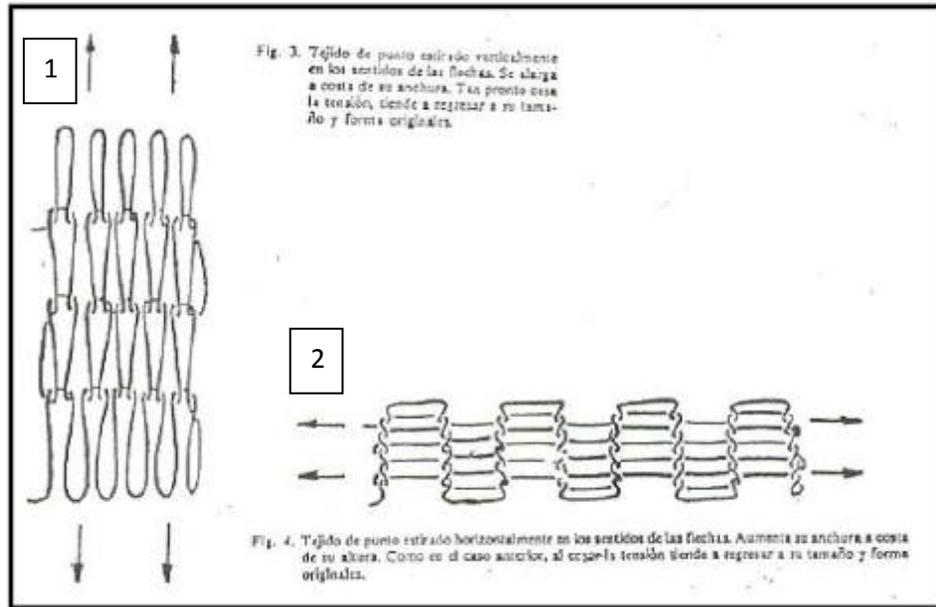


Figura 31: Tejido de punto en sus dos direcciones

2.4.4 DIFERENCIA ENTRE TEJIDO Y MEMBRANA

Las láminas de plástico y las telas no tejidas como la napa, se consideran membranas isótropas, debido a que tienen las mismas propiedades en cualquier dirección comportándose de forma igual en todas ellas una vez sometidas a un estado de carga.

Normalmente los tejidos empleados en la fabricación de tiendas y carpas son membranas con anisotropía ortogonal, lo cual significa que tienen dos direcciones predominantes normales entre sí, cuyo ángulo de cruce puede variar. Las membranas de tejido se deforman más en la dirección de la urdimbre que en la dirección de la trama, ya que los hilos de la urdimbre permanecen más tensos durante el proceso de tejido.

“Los tejidos de fibras naturales y sintéticas son muy elásticos y por ello compensan rápidamente posibles concentraciones de esfuerzos. Generalmente son muy ligeros y pueden deformarse tridimensionalmente, gracias a la posibilidad de variar el ángulo de cruzamiento de los haces ortogonales de la trama y la urdimbre, conjuntamente con posibles deformaciones elásticas y permanentes”.¹⁰⁶

2.5 FIBRAS COMO MATERIAL DE REFUERZO

Un material compuesto parte de la idea principal de combinar las propiedades de distintos materiales. Se forman a partir de dos o más materiales, produciendo propiedades que no se encuentran en ningún material sencillo. Gracias a los compuestos se producen materiales ligeros, resistentes, dúctiles y resistentes a las temperaturas.¹⁰⁷

Los materiales compuestos constan de dos fases: una primaria y la otra secundaria; la primera fase conforma la matriz, dentro de la cual se incorpora la segunda fase. La segunda fase incorporada es entendida como un agente de refuerzo. Esta última fase puede ser en forma de fibras. Generalmente las fases son insolubles una en otra, pero debe existir una fuerte adhesión entre sus interfases.¹⁰⁸

La fase conocida como matriz puede ser cualquiera de los materiales considerados básicos: polímeros, metales o cerámicas.

Las principales funciones de un material compuesto son las siguientes:

¹⁰⁶ Otto, Estructuras. *Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. (Primera edición) (Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A., 1973)

¹⁰⁷ Donald R. Askeland, et al. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, (sexta edición) (México, D.F.: Cengage Learning, 2014)

¹⁰⁸ Mikell Groover, *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas* (México, Ed. Prentice Hall, 1997)

- Se le da forma al producto hecho de material compuesto
- Mantiene en su lugar a la fase incorporada, siendo frecuentemente ocultada
- Al aplicarse una carga, la matriz la comparte con la fase secundaria.

Las funciones anteriores dependen de la proporción de fibras en el compuesto, es decir que las propiedades se incrementan conforme aumenta el contenido de fibra. La capacidad de refuerzo de una fibra depende del grado en que los esfuerzos pueden serle transferidos desde la matriz, grado que a su vez está regido por las características intrínsecas de la fibra, como: resistencia a la tensión y a deformaciones superiores, siempre que las fibras y la matriz se conserven totalmente adheridas.¹⁰⁹

Los compuestos en matriz polimérica se pueden dividir en tres categorías con respecto a su fase secundaria: con partículas, con fibras y laminares. Particularmente en un compuesto con fibras es importante el conocer la orientación de estas al ser aplicadas, como se puede observar en la figura 32:

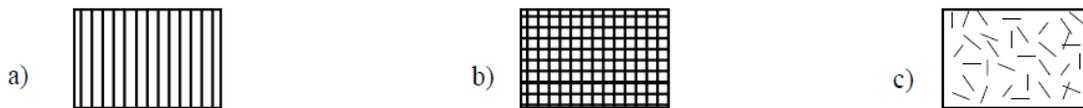


Figura 32: Orientación de las fibras en materiales compuestos. a) Unidimensional b) bidimensional c) Aleatoria¹¹⁰

¹⁰⁹ Sayra Conde Rito, “Estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de palas de aerogeneradores de pequeña potencia” (Tesis de licenciatura, Oaxaca, Universidad del Itsmo, 2010)

¹¹⁰ Sayra Conde Rito, “Estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de palas de aerogeneradores de pequeña potencia” (Tesis de licenciatura, Oaxaca, Universidad del Itsmo, 2010)

2.5.1 BIOCOSMOSITES

Se entiende por biocomposite a un material formado por una resina y un refuerzo de fibras naturales.

El Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS) y el Instituto Tecnológico Textil (AITEX) han obtenido los primeros resultados del proyecto BIOAVANT a escala de laboratorio. BIOAVANT es un proyecto que tiene como objetivo el desarrollo tecnológico y la difusión de nuevos biocomposites¹¹¹ avanzados que funcionen como alternativa a aquellos fabricados con materiales tradicionales.

Para el desarrollo de los biocomposites, se pretende utilizar resinas cuya composición incluya materias primas procedentes de origen renovable y esfuerzos elaborados a partir de fibras naturales (lino, cáñamo o yute) así como aditivos y puedan mejorar sus propiedades.

Los resultados tratan de unos laminados de biocomposites a partir de bioresinas y estructuras textiles que ahora se caracterizarán para obtener los primeros prototipos.

El objetivo final del proyecto es acabar fabricando un demostrador de microeólica con este nuevo composite, previamente se van a desarrollar tres prototipos de piezas, concretamente la puerta de acceso a un barco de pesca, un contenedor de los utilizados para almacenar sal en época de nieve y la bandeja de soporte de un panel solar para el calentamiento de agua.

Para ello, AIMPLAS ha identificado y modificado las bioresinas con el fin de aumentar su resistencia al fuego, así como para mejorar su compatibilidad

¹¹¹ Los composites o resinas compuestas son materiales sintéticos que están mezclados heterogéneamente y que forman un compuesto, como su nombre indica. Están compuestos por moléculas de elementos variados, dichos componentes pueden ser de dos tipos: los de cohesión y los de refuerzo (Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Composite>)

con las fibras naturales y adaptarlas a los distintos sistemas de procesado empleados en el proyecto.

Por su parte, AITEX ha seleccionado y modificado las fibras naturales y ha desarrollado la estructura de tejido idóneas para cada pieza, así como los aditivos ignifugantes y aquellos que garanticen la compatibilidad con las bioresinas, algo muy importante para asegurar la adhesión. Actualmente, se están evaluando las propiedades mecánicas y de resistencia al fuego de las estructuras laminadas obtenidas a partir de técnicas como infusión, RTM- light y de moldeo por compresión, para acabar fabricando los tres prototipos a escala de planta piloto.¹¹²

¹¹² Rosa Velázquez, *IZARO: Manufacturing technology*, 2014 (Fecha de consulta: 26 de marzo de 2014)

2.6 PROPIEDADES MECANICAS DE LAS FIBRAS

De acuerdo a investigaciones consultadas, las propiedades mecánicas de las fibras naturales que se estudian en esta investigación son las siguientes:

FIBRA	LONGITUD DE LA FIBRA (CM.)	DIAMETRO (MM)	DENSIDAD (g/cm ³)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm ²)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kg/cm ²)	ALARGA-MIENTO A LA ROTURA (%)
Cáñamo ¹¹³	-	-	1.48	-	2850	1.3
Henequén ¹¹⁴	-	.18	-	120,000	6000	4-6.6
Coco ¹¹⁵	-	0.10-0.46	1.15-1.46	40,000-60,000	1310-2200	15-40
Caña de azúcar ¹¹⁶	50-300	.20-.40	1.20-1.30	150,000-190,000	1700-2900	-

¹¹³ M.D. Salvador, “Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas” Instituto de tecnología de materiales, Universidad Politécnica de Valencia, España.

¹¹⁴ Luis Felipe Carrillo Lara, “Modificación de las propiedades interfaciales en materiales compuestos polietileno de alta densidad-fibra de henequén” Universidad autónoma metropolitana, Tesis de maestría, Enero 1998

¹¹⁵ Sayra Conde Rito, “estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de palas de aerogeneradores de pequeña potencia” tesis de ingeniería, Universidad del Itsmo, Oaxaca, Diciembre de 2010

¹¹⁶ Cesar Antonio Juárez Alvarado, “Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (agave lecheguilla), como materiales para construcción en México” Universidad autónoma de Nuevo León, Tesis de doctorado en ingeniería, Junio de 2002

CAPITULO III

3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

El comportamiento mecánico de los materiales se describe por sus propiedades mecánicas, las cuales se pueden medir con sencillas pruebas idealizadas, dichas pruebas se diseñan para representar distintos tipos de condiciones de carga.

Las propiedades mecánicas de los materiales son las que determinan su comportamiento cuando se sujeta a esfuerzos mecánicos. Dentro de dichas propiedades se incluyen el módulo de elasticidad, ductilidad, dureza, entre otras.

La importancia del estudio de las propiedades mecánicas radica en el desempeño y funcionamiento de un material, que dependerá en gran medida de su capacidad para resistir deformaciones ante un esfuerzo, teniendo como propósito que el material pueda resistir los esfuerzos a los que estará sometido sin que se genere un cambio radical en su geometría, esto dependerá a grandes rasgos del módulo de elasticidad y la resistencia a fluencia del material.

A continuación se describen algunos conceptos utilizados comúnmente para determinar las propiedades mecánicas de los materiales y que se emplearan en la etapa de experimentación de los siguientes capítulos.

3.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

- **Esfuerzo:** Es la fuerza que actúa por unidad de área sobre la que se aplica una fuerza. El esfuerzo regularmente se expresa en psi (libras por pulgada cuadrada) o en Pa (pascales).
- **Deformación unitaria:** se define como el cambio en extensión por unidad de longitud. La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa como pulg/pulg o cm/cm.
- **Deformación elástica:** Es definida como la deformación recuperable por completo que se deriva a partir de un esfuerzo aplicado. Se dice que la deformación es “elástica” cuando se desarrolla de manera instantánea (Es decir, la deformación ocurre tan pronto como se aplica la fuerza), permanece mientras se aplica el esfuerzo y se recupera cuando se retira la fuerza.
- **Deformación plástica:** o permanente de un material, en este caso cuando se elimina el esfuerzo, el material no regresa a su forma original.
- **Resistencia a la fluencia:** Se define como el nivel de esfuerzo que debe excederse para que el material se deforme de manera plástica.
- **Prueba a tensión:** mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada de manera lenta. Generalmente, las rapidezces de deformación de una prueba de tensión son pequeñas.
- **Limite elástico:** Cuando a un material se le aplica un esfuerzo, de manera inicial el material presenta una deformación elástica. Conforme dicho esfuerzo continúa incrementando, el material fluye

con el tiempo al esfuerzo aplicado y su deformación se vuelve elástica y plástica. El inicio de la deformación plástica, es causado por un esfuerzo crítico y es ahí cuando se define el límite elástico del material.

- **Límite proporcional:** se define como el nivel de esfuerzo sobre el cual la relación entre el esfuerzo y la deformación es no lineal.
- **Resistencia a la tensión:** es el esfuerzo obtenido en la fuerza aplicada más alta, la cual es el esfuerzo máximo en la curva de esfuerzo-deformación.
- **Módulo de elasticidad o de Young:** Es la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. La rigidez de un componente es proporcional a su módulo de Young. Un componente con un modulo de elasticidad alto mostrará cambios mucho menores en la dimensiones si el esfuerzo aplicado solo ocasiona una deformación elástica cuando se compara con un componente con un módulo de elasticidad menor.¹¹⁷ como medida de rigidez, un alto módulo indica inextensibilidad y uno bajo corresponde a la flexibilidad.

A la relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica se le conoce como ley de Hooke:

$$E = \frac{S}{e}$$

En donde:

S= Esfuerzo ingenieril

e= Deformación ingenieril

¹¹⁷ Donald Askeland, et al. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, (sexta edición) (México, D.F.: Cengage Learning,2011)

- **Razón de poisson (v):** Relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo de tensión sencillo o un esfuerzo de compresión con la deformación lateral que ocurre de manera simultánea:

$$v = \frac{-e \text{ lateral}}{e \text{ longitudinal}}$$

- **Tenacidad a la tensión:** Se le conoce así, a la energía absorbida por un material antes de fracturarse.

- **Ductilidad:** Es la habilidad de un material a deformarse de manera permanente sin romperse cuando se aplica una fuerza. Existen dos medidas comunes de la ductilidad:

-El porcentaje de elongación: mide la deformación plástica permanente en la falla (es decir, no se incluye la deformación elástica recuperada después de la fractura) midiendo la distancia entre las marcas calibradas en el espécimen antes y después de la prueba. El porcentaje de elongación se describe como:

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

En donde:

l_f = distancia entre las marcas calibradas después de que el espécimen se rompe.

l_0 = distancia original entre las marcas calibradas.

-El segundo método es la medición del cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después de la prueba. La reducción porcentual en el área describe la cantidad de adelgazamiento experimentado por el espécimen durante la prueba:

$$\% \text{ de reducci } n \text{ en el } rea = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

En donde:

A_f = Área de la sección transversal final en la superficie de fractura

A_o = Área de la sección transversal original del espécimen antes de que comience la prueba.

- **Propiedades ignifugas:** La resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen a altas temperaturas, mientras que su ductilidad aumenta. En el caso de los polímeros, el término temperatura alta, generalmente se refiere a una temperatura mayor que la temperatura de transición vítrea. La temperatura de transición vítrea es una temperatura por debajo de la cual los materiales se comportan como materiales quebradizos. Los plásticos se vuelven dúctiles bajo la temperatura de transición vítrea. Dicho tipo de temperatura no es fija, pero depende de la rapidez de enfriamiento al igual que la distribución de pesos moleculares en los polímeros. Muchos materiales poliméricos se volverán más duros y quebradizos a medida que se exponen a temperaturas que estén por debajo de sus temperaturas de transición vítrea.¹¹⁸
- **Fatiga:** Es la reducción de la resistencia o falla de un material a causa de un esfuerzo repetitivo, el cual puede estar por arriba o debajo de la resistencia a la fluencia. Regularmente, algunos materiales tienen sus esfuerzos bajo la resistencia a la fluencia, sin embargo cuando el

¹¹⁸Donald Askeland, et al. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, (sexta edición) (México, D.F.: Cengage Learning, 2011)

esfuerzo ocurre un número suficiente de veces, ocasiona falla por fatiga.

Regularmente, las fallas por fatiga ocurren por etapas. Al principio se inicia o nuclea una grieta pequeña con frecuencia un tiempo suficiente después de que comienza la carga. Generalmente los sitios de generación de núcleos se localizan cerca o en la superficie, donde el esfuerzo está al máximo e incluye defectos en la superficie ya sean rayaduras o picaduras, inclusiones, etc. Después, la grieta se propaga de manera gradual a medida que la carga continúa ciclándose. Finalmente ocurre una fractura repentina del material cuando la sección transversal restante del material es muy pequeña para soportar la carga aplicada. Por lo tanto, los componentes fallan por fatiga aun cuando el esfuerzo aplicado total puede permanecer debajo del límite elástico, a una escala de longitud local, el esfuerzo excede por mucho a la resistencia a la tensión.¹¹⁹ Para que la fatiga se produzca, mínimo una parte del esfuerzo en el material tiene que ser a tensión.

A medida que las fibras comienzan a degradarse respondiendo a la fatiga, el módulo de elasticidad disminuye y ese debilitamiento se observará antes de la fractura debido a la fatiga.

3.1.2 PRUEBA A TENSIÓN

En este ensayo se le aplica una fuerza que tensa al material estirándolo y reduciendo su diámetro.¹²⁰

¹¹⁹ Donald Askeland, et al. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, (sexta edición) (México, D.F.: Cengage Learning, 2011)

¹²⁰ Mikell Groover, *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas* (México, Ed. Prentice Hall, 1997)

La prueba a tensión, incluye propiedades importantes como son: la resistencia a la fluencia, la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad, el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción del área.

Al llevar a cabo la prueba a tensión (Figura 33) se toma en cuenta que el espécimen de prueba inicial tiene una longitud original (L_0) y un área (A_0). La longitud es medida por la distancia entre las marcas de calibración, y el área, por la superficie de la sección transversal del espécimen. Durante la prueba a un metal, por ejemplo, este se estira, luego desarrolla una especie de “cuello” y al final se fractura.

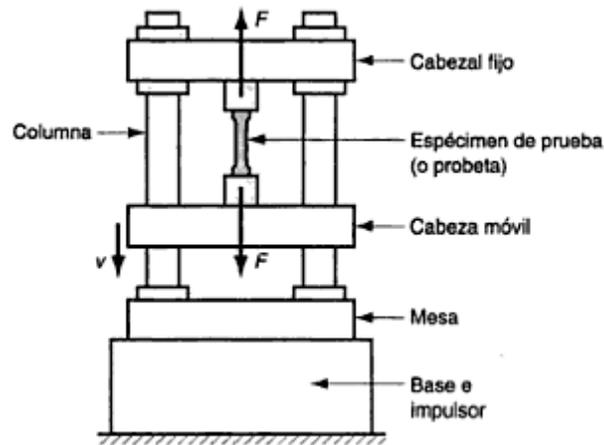


Figura 33: Instalación de la prueba a tensión¹²¹

La carga y el cambio de longitud de un espécimen se registran conforme avanza el proceso de la prueba, ambos datos serán necesarios para determinar las relaciones esfuerzo-deformación.

Existen dos tipos de curvas esfuerzo-deformación:

1. Esfuerzo-deformación ingenieril: Es importante en el diseño
2. Esfuerzo-deformación real: Es importante durante su manufactura

¹²¹ Groover, Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas (México, Ed. Prentice Hall, 1997)

3.1.3 ESFUERZO-DEFORMACIÓN INGENIERIL

Los resultados de un ensayo se aplican a todos los tamaños y secciones transversales de las muestras para un material dado, si se convierte la fuerza a esfuerzo y la distancia entre las marcas calibradas a deformación.

El esfuerzo ingenieril y la deformación ingenieril se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = S = F/A_0$$

$$\text{Deformación ingenieril} = e = \Delta l/l_0$$

En donde:

A_0 : es el área de la sección transversal original del espécimen antes de que comience la prueba

l_0 : Es la distancia original entre las marcas calibradas

Δl : Es el cambio de longitud después de que se aplica la fuerza

F: fuerza

Por citar un ejemplo, en la figura 34 se muestra una curva esfuerzo-deformación ingenieril típica en un ensayo de un espécimen metálico.

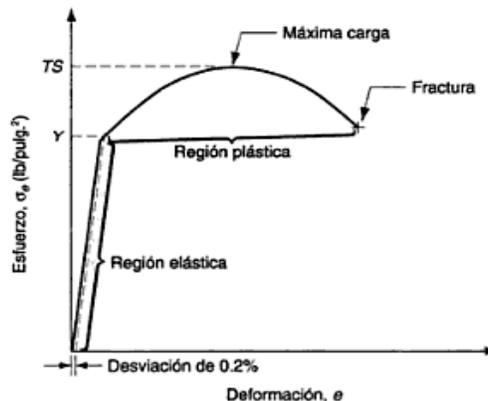


Figura 34: Curva esfuerzo-deformación para un metal¹²²

¹²² Groover, Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas (México, Ed. Prentice Hall, 1997)

Se observa que la relación esfuerzo-deformación en dicha figura cuenta con 2 regiones que indican 2 tipos de comportamiento: elástico y plástico.

En el caso de la región elástica, la relación entre esfuerzo-deformación es lineal, aquí el material puede regresar a su forma original cuando es liberado de su carga.

Cuando se aumenta el esfuerzo, se llega a un punto en la relación lineal donde el material comienza a ceder. Este punto de fluencia “y” del material es identificado por el cambio de pendiente al final de la región lineal. El punto de fluencia es el que define la transición a la región plástica y el inicio de la deformación plástica del material, en la cual no regresara a su forma original.

Al aumentarse la carga por encima del punto de fluencia continua la elongación del espécimen, a una velocidad mayor causando un cambio drástico en la pendiente de la curva, aunado a esto, también se observara una reducción uniforme en el área de sección transversal.

Para finalizar, la carga aplicada (F) alcanza su máximo valor y el cálculo de esfuerzo ingenieril para este punto se denomina resistencia a tensión.

En la figura 35 se muestran las curvas esfuerzo-deformación normales para un material a) metálico, b) termoplástico, c) elastómero y d) cerámica, vidrio y concreto, todos se encuentran a rapidezces de deformación pequeñas relativamente. En el caso del material termoplástico, este se encuentra por encima de su temperatura de transición vítrea, (T_v) Suponiendo que la temperatura del material metálico esta a la temperatura ambiente. Los materiales termoplásticos y metálicos presentan una región elástica al inicio seguida por una región plástica no lineal. También se incluye una curva separada para los elastómeros, debido a que el comportamiento de dichos materiales es diferente comparado al de otros materiales poliméricos. En los elastómeros, una gran porción de la deformación es elástica y no lineal. Por último, las cerámicas y vidrios a temperatura ambiente solo muestran una

región elástica lineal y casi ninguna deformación plástica cuando se encuentra a temperatura ambiente

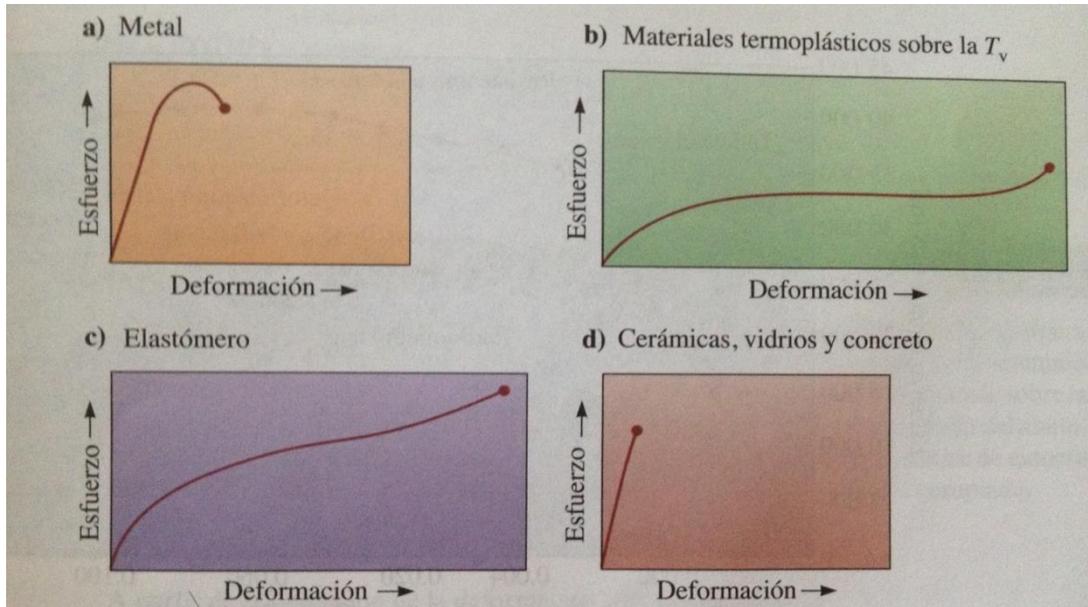


Figura 35: Curvas esfuerzo-deformación para diferentes materiales¹²³

3.1.4 PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO ASTM A36

El acero ASTM A36 es el que se utiliza comúnmente en la construcción, es un acero estructural al carbono el cual se pretende tomar como referente para ilustrar sus propiedades ante las fibras naturales, en la tabla 7 se observan sus propiedades mecánicas.

	Diámetro (mm)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de elasticidad (Kg/cm ²)	Resistencia a la tensión (Kg/cm ²)
ASTM A-36	Menor a 203.20 mm	7850	2500	4000-5500

Tabla 7: Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36¹²⁴

¹²³ Donald Askeland, et al. *Ciencia e ingeniería de los materiales*, (sexta edición) (México, D.F.: Cengage Learning, 2011)

¹²⁴ Pablo Hernández Castro, Acero ASTM A 36, <http://es.scribd.com/doc/89693272/Acero-ASTM-A36>

3.2 MÉTODO DE PRUEBA ASTM D3822

El método a emplear para realizar la prueba de experimentación efectuada en el laboratorio es la norma ASTM D3822, la cual se utilizó para las propiedades a tensión de las fibras textiles individuales.

Dicha prueba, tiene como objetivo la medición de la tensión de las propiedades de las fibras textiles naturales y artificiales de una longitud suficiente que permita el montaje de especímenes en una maquina de prueba a tensión.

Se debe de tomar en cuenta que las propiedades a tensión determinadas en las fibras extraídas a partir de hilos que han sido procesados en telas, pueden ser diferentes para las mismas fibras antes de ser sometidos a procesos de hilado o tejido en su fabricación.

En cuanto a la longitud de las fibras, las fibras naturales o fibras que tienen menores o mayores longitudes de calibre pueden proporcionar diferentes valores y pueden requerir de pruebas comparativas. Cuando se hacen comparaciones, se recomienda realizar una competente asistencia estadística para la investigación del margen de error.

“La tenacidad a rotura, calculada a partir de la fuerza de rotura y la densidad lineal y la elongación son propiedades fundamentales que son ampliamente utilizadas para establecer limitaciones en el procesamiento de la fibra o conversión y en sus aplicaciones de uso final.”

El modulo inicial es una medida de resistencia de la extensión de la fibra a las fuerzas por debajo del límite de elasticidad. El modulo tangente y el esfuerzo de tensión para un alargamiento específico puede utilizarse para diferenciar entre el probable desempeño de las fibras en el procesamiento y el desempeño en el uso final.

Para efectuar la prueba se emplea un aparato de velocidad constante de extensión, la cual tiene una adecuada respuesta a características de la curva

esfuerzo-deformación de las fibras. En algunos casos la máquina de ensayo puede estar equipada de un equipo auxiliar, que permite el registro automático de los datos o el cálculo de cualquier propiedad a tensión requerida.

Para llevar a cabo la prueba de especímenes, primeramente se mide la densidad lineal de cada espécimen, se selecciona el rango de fuerza apropiado para la fibra en el aparato y se verifica que el medidor de tensión este dentro de la calibración, tal como se especifica en las instrucciones del fabricante, después se ajusta la distancia entre las abrazaderas para obtener la selección de la longitud nominal de calibre, las longitudes más comunes son de 10, 20, 25 y 250 mm.

Cuando las comparaciones se tienen que hacer entre diferentes fibras o cuando se requiere hacer dichas comparaciones en laboratorios diferentes, es recomendable usar el mismo número de longitud de calibre en todas las pruebas.

Se coloca una etiqueta en el espécimen de fibras antes de colocarse en la máquina de ensayo, la distancia entre las pestañas definirá la longitud nominal del calibre. Después se ajusta la velocidad de extensión para proporcionar una velocidad de extensión especificada en la tabla 8 para la longitud del calibre seleccionado.

Elongación estimada para romper el espécimen %	Velocidad de extensión, % inicial del espécimen Longitud/min
Debajo de 8	10
8 a 100, incl.	60
Por encima de 100	240

Tabla 8: Velocidad de extensión¹²⁵

¹²⁵ ASTM D3822, Standard test method for tensile properties of single textile fibers

En caso de que se utilice un microprocesador automático de un sistema de recolección de datos, se deberán establecer los parámetros apropiados definidos en las instrucciones del fabricante.

Para el condicionamiento de los especímenes, se deben realizar en una atmosfera estándar para pruebas en textiles es decir, de $21.6 \pm 1^\circ \text{C}$ ($70^\circ \text{F} \pm 2$) y $65.6 \pm 2\%$ de humedad relativa.

Por consiguiente, se monta el espécimen a prueba en las mandíbulas de las pinzas, eliminando la holgura sin estirar el espécimen, este debe ser recto entre las mordazas, es necesario recalcar que cualquier desalineación tiende a producir un movimiento transversal entre las mordazas y pinzas e introducir errores en las mediciones y posteriormente contribuir al fallo prematuro de la fibra.

Para la prueba de especímenes de cada unidad de muestra del laboratorio se deben tomar 20 muestras de fibras al azar. Si la desviación estándar determinada para 20 especímenes es más que un valor acordado entre el comprador y proveedor antes de la prueba, se continúa con las pruebas en grupos de 20 ejemplares de la misma unidad de muestras de laboratorio hasta que la desviación estándar para todas las muestras analizadas no es más que el acordado a valorar, o por acuerdo detener la prueba después de un número determinado.

Después se enciende la máquina de ensayo a tensión y el equipamiento auxiliar, extendiendo el espécimen de fibra para romperlo a una extensión de velocidad seleccionada y registrar los datos que sean interesantes. Cuando se rompe el espécimen, se debe regresar a las condiciones de inicio de la máquina y retirar los restos de espécimen roto.

A continuación, se siguen probando las muestras sucesivas, hasta que los especímenes restantes se hayan roto, si por alguna razón el espécimen se desliza en las mordazas, se rompe en el borde y el resultado de operación cae un 20 % de acuerdo a la media de fuerza de rotura para el conjunto de

especímenes se descarta el resultado y se prueba con otro espécimen. La decisión de descartar los resultados de un rompimiento será basado en la observación del espécimen durante la prueba y la variabilidad inherente de la fibra.

Si una fibra manifiesta cualquier deslizamiento de las mordazas o si más del 25% de especímenes rotos dentro de un punto de 3 mm. (1/8 in.) al borde de la mordaza, entonces, las mordazas pueden ser rellenadas o la fibra se puede recubrir bajo el área de la cara de la mordaza o si se requiere, la superficie del borde de la mordaza puede ser modificado. Si alguna de las modificaciones mencionadas anteriormente se utiliza, se indicara el método de modificación en el informe.

Por último se procede a realizar los cálculos correspondientes; después se realiza un informe en el cual se describe el material y el método que ha sido empleado, el cual debe incluir el promedio de los siguientes conceptos:

1. Fuerza promedio de rotura
2. Fuerza promedio de tenacidad o tenacidad de elongación específica.
3. Promedio de la elongación a la rotura u otra fuerza específica.
4. Promedio del modulo inicial
5. Promedio del modulo sensible y las dos elongaciones utilizadas en el cálculo.
6. promedio del modulo tangente y el punto en la curva esfuerzo-deformación en la que se calcula.
7. Esfuerzo de tensión y la elongación específica
8. Resistencia a la rotura y si está o no el trabajo para remover el rizado incluido en el valor.
9. Desviación estándar, coeficiente de variación o ambos, para cada propiedad si se calcula.
10. Longitud efectiva del espécimen, cuando sea aplicable.

11. Pruebas de temperatura y porcentaje de humedad relativa si la prueba se realizó en especímenes condicionados u otras condiciones estándar para pruebas en textiles.
12. Para especímenes húmedos, el clima en los especímenes probados, la humedad del aire, o mientras fueron inmersos, y la temperatura del agua.
13. Si se requiere, incluir la curva fuerza-elongación con la gráfica de unidades de eje y la velocidad indicada, como parte del reporte.
14. Número de especímenes probados
15. Pretensión aplicada, en su caso.
16. Marca y modelo de la máquina de prueba a tensión
17. Tipo de mordazas utilizadas
18. Tipo de relleno utilizado en las abrazaderas, la técnica de etiquetado de especímenes agarrados en las mordazas o la modificación de la cara de las mordazas si se utiliza.
19. Longitud nominal del cable, el error de sujeción, comparación de la extensión del espécimen y una escala completa de rango de fuerza utilizado para la prueba.
20. Para los datos derivados de la computadora, identificar como la pendiente y los puntos de rompimiento fueron determinados e identificados por el programa (software) utilizado.

CAPITULO IV

4.1 ANÁLISIS DE LAS FIBRAS Y GEOMETRÍA A EMPLEAR

Como primer paso para investigar el empleo de una fibra natural en una cubierta es necesario establecer una geometría.

Se ha planteado probar la eficiencia y estabilidad de las fibras naturales para ser empleadas como material principal en cubiertas tensadas, empleando el paraboloides hiperbólico como su geometría constitutiva. La fibra de coco y la fibra de henequén han resultado ser muy resistentes y elásticas en investigaciones anteriores, ya que se han utilizado como refuerzo para matrices de concreto y placas de yeso.

Es necesario analizar por medio de pruebas a tensión el uso de fibras naturales en cubiertas tensadas con el fin de conocer los esfuerzos en el rango elástico y plástico que se presentan por medio de los resultados obtenidos y analizar el módulo de elasticidad de las fibras.

Es indispensable determinar las propiedades mecánicas de las fibras bajo diferentes condiciones de carga. Ya que al estar sometida a esfuerzos cíclicos, la fibra deberá regresar a su estado natural después de la carga aplicada, ya sea por viento, sismo, lluvia, temperaturas extremas, etc.

Esta información será necesaria para obtener valores certeros y precisos sobre las fibras propuestas, a partir de ellos se conocerá cual de las dos fibras (coco o henequén) podría emplearse en la construcción de cubiertas tensadas.

A partir de la evaluación de dichas fibras, una de ellas resultará con mayor capacidad de resistencia a deformación y fractura.

Se realizarán pruebas a tensión a las fibras que se tienen como objeto de estudio, que pudieran emplearse en la cubierta. Dichas pruebas serán establecidas bajo la norma ASTM D3822.

Finalmente se realizarán prototipos en maqueta empleando diferentes tipos de entramados para la cubierta. El objetivo es comprobar el empleo de las fibras naturales en cubiertas tensadas.

Para la realización de lo anterior, el método se divide en las siguientes etapas:

1. Elección de la geometría a emplear: se deberán realizar modelos de las geometrías descritas en el marco teórico, así como su análisis para elegir la más óptima.
2. Obtención de las fibras de coco y henequén: Las fibras de coco fueron adquiridas en el mercado Jamaica, ubicado en la delegación Venustiano Carranza en México, Distrito Federal.
En cuanto a las fibras de henequén, fueron compradas en ACORMEX, empresa mexicana dedicada a la venta de fibras naturales y artificiales, el henequén es exportado desde Yucatán, ACORMEX está ubicada en la delegación Venustiano Carranza, en el D.F.
Es importante mencionar que las fibras de coco y henequén no tienen ningún tratamiento industrial y/o químico.
3. Selección de fibras a emplear: Se seleccionarán las fibras que presenten una mayor longitud, rigidez y se encuentren en buen estado.

4. Realización de entramados de tejidos: se confeccionaran manualmente 3 posibles entramados con fibras naturales para analizar el más apropiado para una cubierta tensada.
5. Elaboración de un sintético con fibras naturales: se elaborarán 2 capas de caucho de silicón con fibras naturales.
6. Conformación de probetas: se realizaran diferentes tipos de probetas, las cuales serán sometidas a una prueba a tensión respectivamente de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM D3822.
 - 3 probetas de fibra de coco
 - 3 probetas de fibra de henequén
 - 20 probetas de la fibras que resulte con mejores propiedades mecánicas
 - 4 probetas con los tejidos más apropiados para la cubierta
7. Realización de la prueba a tensión: se efectuarán varias pruebas a tensión regidas bajo la norma ASTM D-3822
8. Análisis de resultados: se elaborarán gráficos de esfuerzo-deformación para observar y analizar los resultados en cada prueba, en cuanto a las 20 probetas de la fibra elegida, se calculará un promedio contemplando los valores arrojados.
9. Comparación de resultados con otras fibras: A partir de los valores a tensión evaluados, se hará una comparativa frente a los materiales convencionales empleados en las tensoestructuras actualmente.

4.2 EQUIPO DE MEDICIÓN

- Máquina de pruebas universales Shimadzu AG-100 KNG ubicada en el laboratorio de cristalofísica y materiales naturales del Instituto de Física de la UNAM.
- Panel digital
- Autograph control software, shimadzu versión 2.2

La máquina de pruebas universales se calibra automáticamente antes de iniciar cada prueba, en la tabla 9 se observan sus características principales.

Modelo:	AG-IC tipo piso AG-100kNIC
Capacidad máxima de celda:	100 kN
Amplificación de la fuerza de medición	X1,2,5,10,20,50,100 (7 rangos ajustables automáticamente)
Calibración	Calibración automática (calibración de la fuerza: tensión, compresión)
Distancia mesa-cruceta (carrera a la tensión)	Max. 1250 mm (760 mm)
Velocidad de la prueba (mm/min) (*1)	0.0005 a 1000
Velocidad de retorno (mm/min)	1100
Precisión velocidad (*2)	±0.1%
Velocidad de cruceta y fuerza máxima permitida	100 kN en el rango completo de velocidad
Ancho efectivo de la prueba	575 mm
Capacidad máxima de carga	100 kN
Dimensiones (mm((modelo standard) (ancho x prof. x alto)	1170x750x2162
Peso (modelo standard)	800 kg.

Tabla 9: Especificaciones de la máquina de pruebas universales Shimadzu AG-100 KNG

En la figura 36 se observa la máquina de prueba, en la cual se realizó el ensayo a tensión de las fibras.



Figura 36: Máquina de pruebas universales Shimadzu AG-100 KNG

En la figura 37 se observa el panel digital, el cual es parte de la máquina de pruebas y en donde se lee el esfuerzo y el desplazamiento de cada espécimen y en la figura 38 se presenta el ordenador que contiene el software en el cual se registraran los datos leídos por el panel digital, el software realiza gráficas preliminares de esfuerzo deformación y captura los datos de desplazamiento por segundo/milímetro.

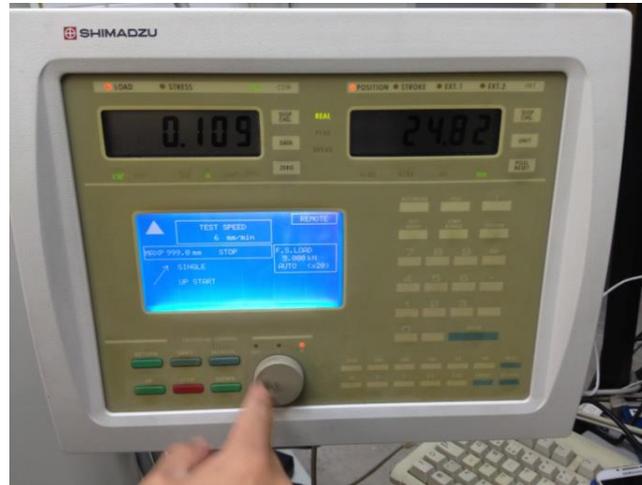


Figura 37: Panel digital shimadzu

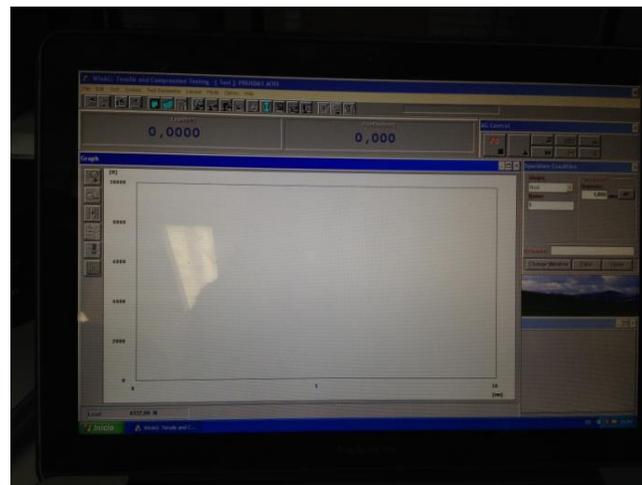


Figura 38: Autograph control software

4.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

La etapa de experimentación se divide en dos fases: la construcción de prototipos de cubiertas, para encontrar su geometría y el tipo de tejido y el análisis de las fibras de acuerdo a su propiedad mecánica, en este caso a tensión.

Para la fase de la construcción de un sistema tensado será necesario:

- Bases de madera de 20x20 cm.

- Hilo de cáñamo de 2 mm. de diámetro
- Hilo de fibra de henequén 3mm de diámetro
- Palos de madera
- Armellas ¼"

Durante el desarrollo de la fase del material se requiere lo siguiente:

- Hilos de fibra de coco
- Hilos de fibra de henequén
- Máquina de pruebas universales shimadzu AG-100 kNG
- Caucho de silicón P-85
- Catalizador
- 2 bases de 18 cm. x 11 cm.
- 1 recipiente con medidas dosificadoras

4.4 ELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA A EMPLEAR

En primer lugar, se realizan 3 modelos en maqueta en los cuales se utilizaran las 3 geometrías típicas en un sistema tensado, es decir, el arco, conoide y el paraboloides hiperbólico.

4.4.1 PARABOLOIDE HIPERBOLICO

En la figura 39 se puede observar cómo se colocaron los postes y armellas que actuarían como soporte en la red de hilos, para después colocar el hilo del perímetro mediante el cual se sujetaría la retícula.

El perímetro quedo completamente estirado y se comenzó colocando primeramente los hilos horizontales (de los lados más cortos) empezando de arriba hacia el centro y así posteriormente con la otra mitad, como se observa en la figura 40. Cada hilo debía estar debidamente amarrado y estirado, si no era así, se producía un aflojamiento en los hilos.

Después, se colocaron los hilos secundarios por debajo de los que ya estaban colocados de las orillas hacia el centro (Figura 41) y de igual forma, estirándolos y haciendo nudos en las puntas. Al final se recortaron los sobrantes de hilo de las orillas y se reacomodaron algunos hilos.

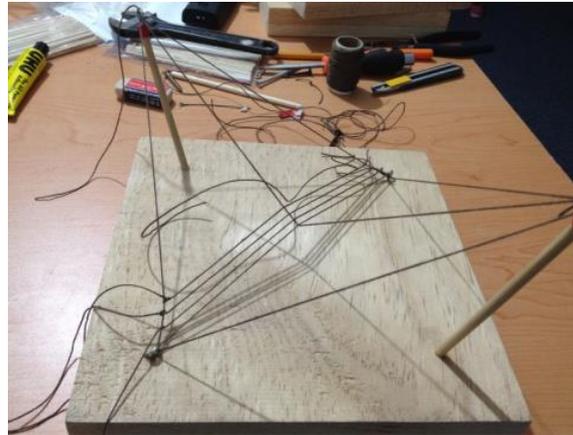


Figura 39: Colocación de hilo perimetral



Figura 40: Colocación de hilos horizontales



Figura 41: Colocación de hilos secundarios

4.4.2 ARCO

En este modelo primero se realizaron dos piezas de madera en forma de arco, debidamente lijadas y posteriormente se realizaron perforaciones a través de las cuales entrarán los hilos, procurando que estuvieran a la misma distancia, después se pegaron los arcos a la base y se colocaron los hilos, en primer instancia los del lado más largo, estirándolos y sujetándolos con nudos en los extremos.

Por último se colocaron los hilos del lado más corto, amarrados a los soportes de los postes exteriores, de igual forma estirados y con fuertes nudos al final. (Figura 42)

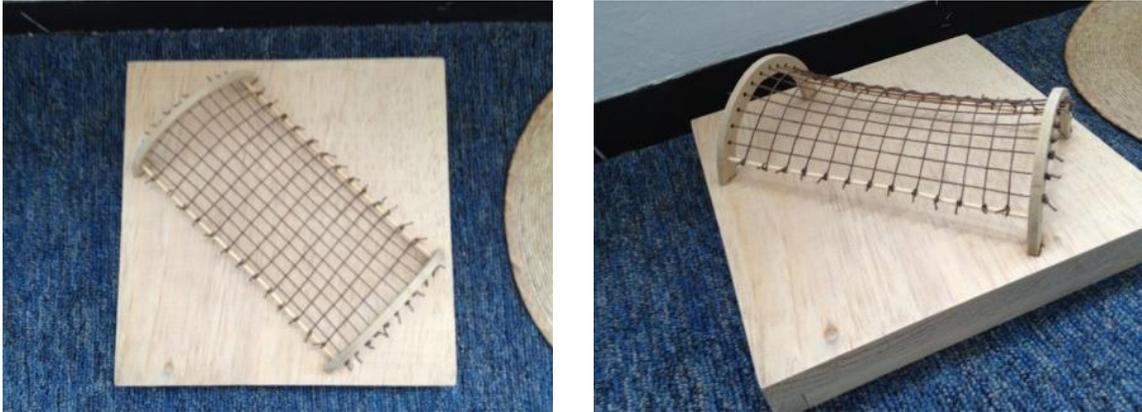


Figura 42: Modelo con geometría de arco

4.4.3 CONOIDE

A partir de una estructura con dos anillos y un mástil en el centro, como se aprecia en la figura 43, se colocaron hilos verticales estirándolos y haciendo amarres en los extremos, por último se colocaron los hilos horizontales y se hizo el amarre en uno de los verticales, estos hilos también debían tener cierto estiramiento.

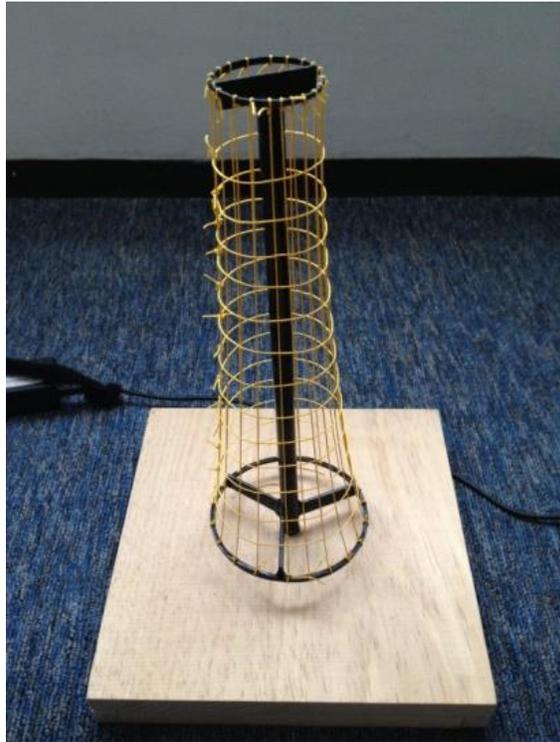


Figura 43: Modelo con geometría de conoide

Se puede observar que es necesario aplicar cierta fuerza de tensión en los hilos, conforme se va colocando un nuevo amarre, el anterior disminuye su tensión y así sucesivamente. Fue necesario ajustar todos los nudos una vez terminada cada uno de los modelos.

Después de realizar las geometrías, se estableció que la del paraboloides hiperbólico resulta la más óptima y adaptable para la conformación de la cubierta, en el apartado de resultados se describe a detalle la determinación del uso de esta geometría.

4.5 MODELOS DE MEMBRANA

Como ya se ha definido, se empleara el paraboloides hiperbólico como geometría principal en la construcción de los prototipos.

Un paraboloides es una cuadrática y aunque su superficie se percibe cuadrada, se puede construir con líneas rectas.

Para conformar el paraboloides, las 4 generatrices de los bordes se proyectaran en planta y todas las secciones paralelas a los bordes se presentan como líneas rectas en los dos sentidos. Para efectuar dicho proceso se dividen cada uno de los lados opuestos en partes iguales y después se unen los puntos de división, para obtener una mayor aproximación a las curvas formadas por el paraboloides, debe haber una mayor cantidad de rectas en la red. Las secciones diagonales y paralelas a dichas secciones, corresponden a las parábolas, pertenecientes a dos familias con curvaturas inversas.

Para la construcción del paraboloides hiperbólico de bordes rectos a base de una red cuadrada es necesario que los 4 vértices del cuadrilátero no se encuentren a la misma altura, ya que de lo contrario resultaría una superficie plana.

La figura 44 muestra como se puede lograr realizar el paraboloides a base de una red rectangular, una vez trazada la red se efectúa la doble curvatura del modelo.

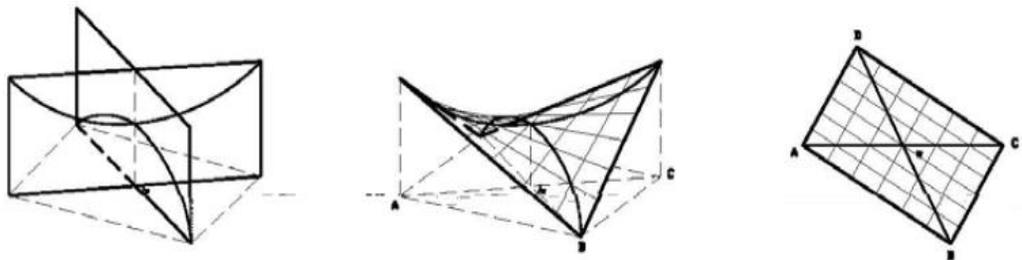


Figura 44: Paraboloides hiperbólico a partir de una superficie cuadrática¹²⁶

¹²⁶ Francisco Cárseles Garralón, *El paraboloides hiperbólico como generador inagotable de formas en las estructuras laminadas*, Universidad Politécnica de Madrid, http://oa.upm.es/3708/2/GARRALON_PON_2008_01.pdf (Fecha de consulta: 07 de septiembre de 2014)

De manera general cada uno de los prototipos de membranas deberá contar con relingas, detalles de los bordes perimetrales y posibles accesorios de amarre a los mástiles. Los modelos se deberán adaptar a la geometría del paraboloides hiperbólico.

Se utilizarán tensores en cada punto de sujeción de la cubierta, para ello es necesario dejar un gancho en cada uno de los 4 extremos de la red para unir la cubierta con el mástil.

Se emplearán mástiles de acero inoxidable fijándole una armella a cada uno de ellos para unir el tensor al mástil. Las armellas se colocarán a través del mástil y se fijarán por detrás con una tuerca.

A partir de esto, se realizaron modelos para contemplar posibles tipos de tejidos que pudieran utilizarse como entramado en la cubierta, utilizando el paraboloides hiperbólico.

Para los modelos de tejidos se utilizaron bases de 20x20 cm., palos de madera de diferentes medidas, no sobrepasando los 20 cm. y armellas de ¼" empleando hilo de mecate de 2 mm. de diámetro.

Para realizar el primer diseño de entramado se empleó una tabla para tejer y como primer paso se colocó el hilo de fibra dentro de la tabla en el primer clavo de plástico sujetándolo mediante un nudo, a partir de ello se comenzó a tejer rodeando cada clavo y cruzándolo al otro extremo realizando la misma actividad hasta lograr la longitud deseada, en este caso fue de 18 cm. tomando en cuenta que la longitud en el resultado final se reduciría alrededor de 3 cm. y la separación de los clavos es de 1.70 cm. entre ejes, después al lograr la longitud deseada se dio la vuelta realizando exactamente lo mismo rodeando cada clavo, pero en sentido contrario.

Por consiguiente se sacó cada punto de abajo del segundo tejido y se repitió la operación hasta lograr la longitud deseada.

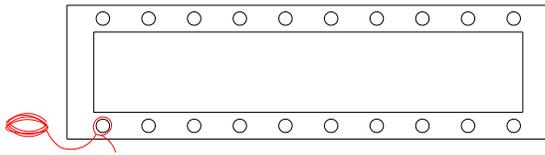


Figura 45: Colocación del hilo dentro de la tabla

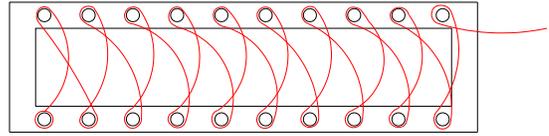


Figura 46: Diseño de entramado para el primer prototipo

En la figura 45 se observa la colocación del hilo y el diseño que caracteriza al entramado, se pretende lograr un tejido consistente y elástico, y en la figura 48 se presenta el hilado en la segunda capa, es decir a la inversa de cómo se tejió en la figura 46.



Figura 47: Inicio del entramado



Figura 48: Segundo tejido en el entramado

En la figura 49 se observa el proceso del tejido y a su vez, la disminución de su longitud al comprimirse conforme va progresando, esta propiedad le permitirá al tejido estirarse una vez terminado. Al llegar a la longitud de 18 cm. se hizo un giro y se realizó el tejido de igual manera pero en el lado contrario.

En la figura 50 se contempla el final del tejido, al ser sacado de la tabla por medio de un gancho, este proceso se realizó liberando el primer punto del primer clavo en el extremo donde finalizó el tejido y colocando ese primer punto en el clavo de enfrente, después de esto se sacó el punto de abajo (hay dos puntos dentro del gancho) y el que quedó se llevó nuevamente al clavo frontal, repitiendo la operación anterior hasta llegar al final y llegado a este se hizo un nudo en el otro extremo y se cortó el hilo.



Figura 49: Proceso de tejido del primer prototipo



Figura 50: Liberación del tejido en la tabla

Finalmente se colocaron postes de madera de 8 cm. 14 cm. y 3 cm. y una armella, todos sujetos a la base y dispuestos en forma que el tejido pudiera ser colocado estirándolo al máximo.(Figura 51)

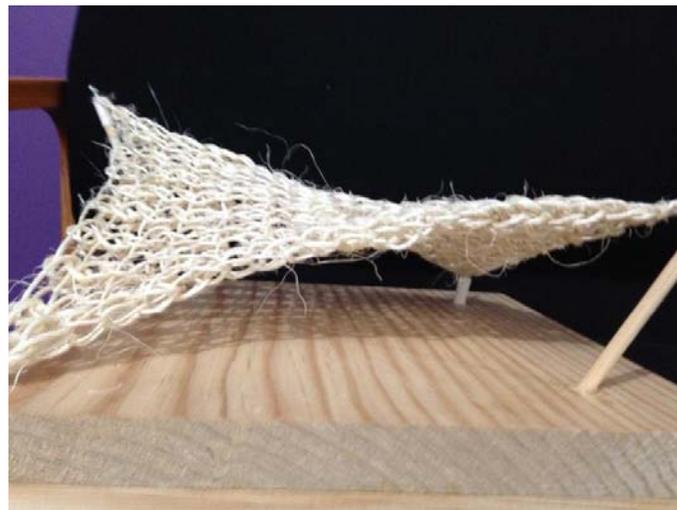


Figura 51: Primer prototipo de cubierta

Para efectuar el segundo prototipo, se realizó un procedimiento parecido al primero, sin en cambio en este, se realizó otro diseño de entramado. Primeramente se colocó el hilo en la tabla y se hizo un trazado rodeando cada clavo como se observa en la figura 52, ya que se logró la longitud deseada, es decir de 16 cm. se realizó el mismo trazado que al principio pero en el lado opuesto, como se observa en la figura 53 y después se liberaron los puntos de abajo y se repitió la operación.



Figura 52: Entramado para el segundo prototipo



Figura 53: Trazado de entramado del lado opuesto

Posteriormente, se fue realizando un tejido más uniforme (Figura 54) que el primero y cuando alcanzó el ancho deseado, se procedió a sacar el tejido de la tabla, repitiendo el procedimiento de como se realizó en el primer tejido, sacando punto por punto y llevándolo al clavo frontal.



Figura 54: Tejido para el segundo prototipo

Con el tejido listo, se procedió a colocar los postes de 10 y 12 cm. y dos armellas sujetas a la base, para después colocar la cubierta tensándola al máximo. (Figura 55)

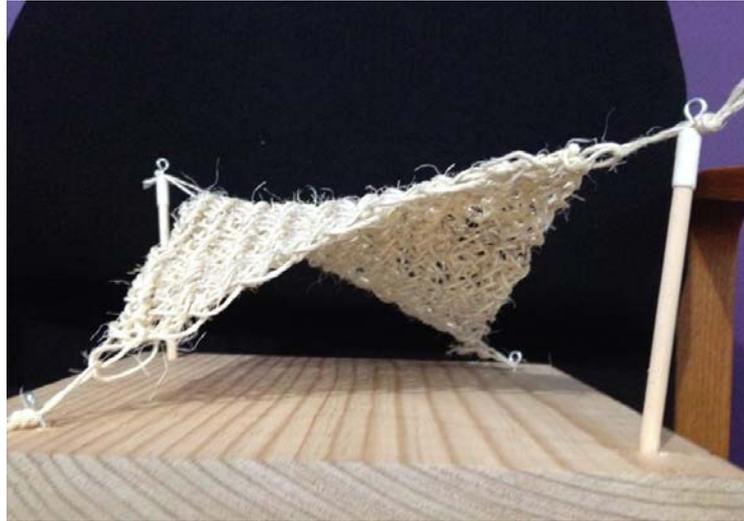


Figura 55: Segundo prototipo de cubierta

Después de realizar los entramados que pudieran servir como cubierta, se colocaron los tensores entre el tejido de punto, estos debían rodear el perímetro de la cubierta y después se tejó una retícula para darle cuerpo y fuerza a la cubierta.

Para el tercer tejido, se realizó un entramado siguiendo la geometría de la tela de araña, para comenzar se colocaron los postes de madera, colocándole armellas en uno de sus extremos para poder sujetar de ahí la cubierta, en total fueron 4 postes de madera (10, 6.5, 8 y 11 cm.) y una armella empotrada a la base.

Después se colocó el hilo, conformando una “Y” tal como la araña teje su tela, asegurándose de hacer un nudo en el centro de la “Y” esto se observa en la figura 56.

Posteriormente, se regresó hacia el centro, dejando doble hilo en cada uno de los trazos de la “Y” para terminar de trazar el perímetro, como se observa en la figura 57 y por último el perímetro quedó conformado tal como se percibe en la figura 58. Se regresó al centro de la “Y” para trazar los hilos secundarios y se terminó en un extremo del perímetro, sujetando el trazado por medio de un nudo.

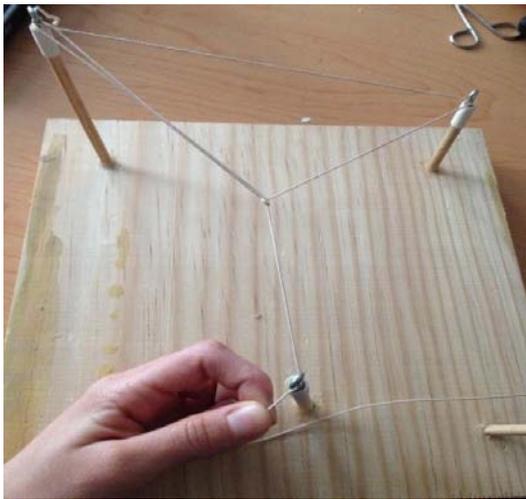


Figura 56: Trazado de la “Y” en el tejido



Figura 57: Trazado del perímetro

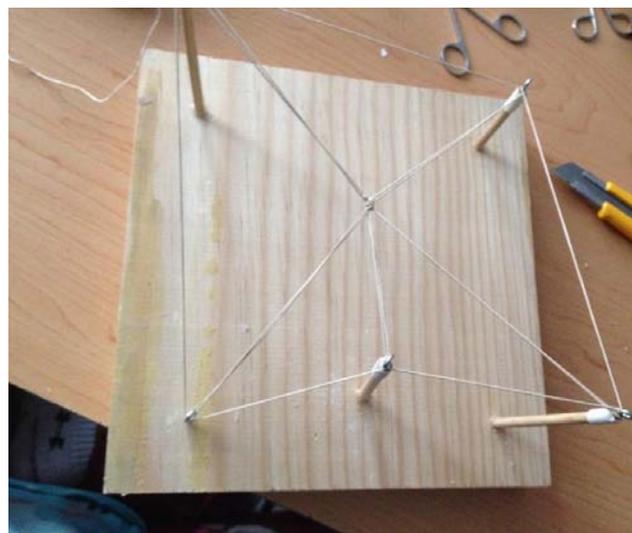


Figura 58: Trazado de la base para conformar la red de tela de araña.

A partir de ello, se colocaron otros dos hilos secundarios que van del centro a uno de los extremos, como se observa en la figura 58, completando esta operación, se procedió a comenzar a trazar la espiral, haciendo un pequeño nudo cada vez que el hilo secundario tocara a la red primaria, como se presenta en la figura 60.

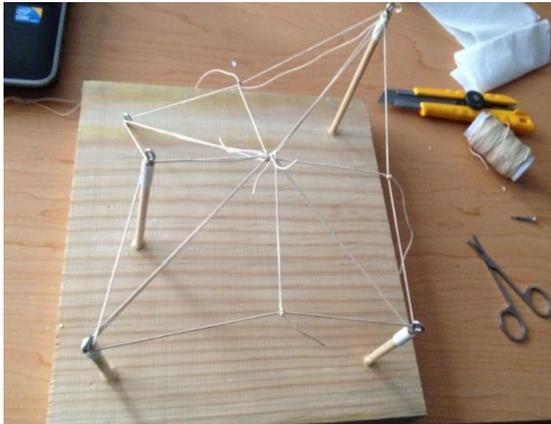


Figura 59: Conformación de la red primaria

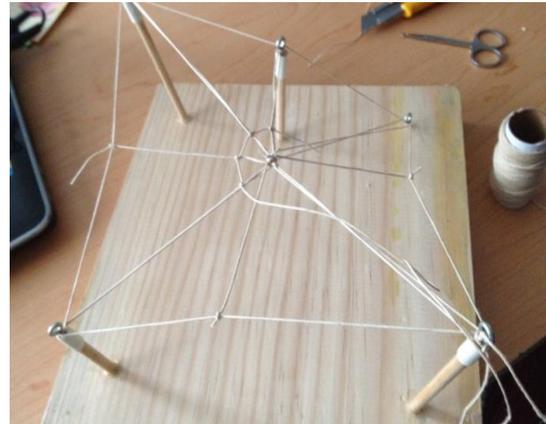


Figura 60: Trazo de la espiral

Para finalizar, la espiral terminó en el punto en el cual ya no había espacio para trazar más puntos, al llegar al punto final se hizo otro nudo y se cortaron los sobrantes de hilo, como se puede observar en la figura 61.

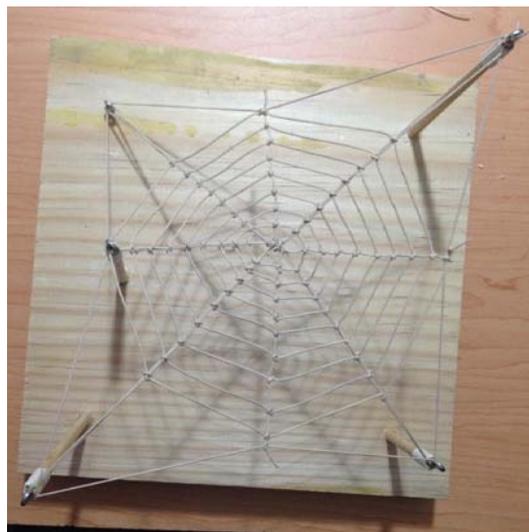


Figura 61: Tercer prototipo de cubierta

El análisis y diseño estructural de las cubiertas tensadas a partir de fibras naturales se desarrolla con la finalidad de reducir la contaminación por parte del sector de la construcción mediante el uso de materiales biodegradables que regresen a su estado natural, además de construir respondiendo a un patrón natural y cultural como lo dicta la biomimesis al tener un contacto directo con la naturaleza, las cubiertas se emplearan al exterior como protección contra el sol y otros factores climáticos, siendo su uso principal en jardines.

4.6 ELABORACIÓN DE SINTETICO CON FIBRAS NATURALES

En el caso del caucho de silicón, este se vació en un recipiente pequeño utilizando 200 ml. del mismo con 80 gotas de catalizador, después se vaciaron las fibras de henequén y en otro recipiente igual, las fibras de coco, previamente las fibras se cortaron a una longitud de 4 mm. aproximadamente, se revolvió la mezcla con una pala hasta verificar que se incorporaran las fibras al silicón y se vació posteriormente en los moldes de plástico, por último se dejó secar durante 1 día.

En la siguiente secuencia de figuras (62-67) se observa el proceso para realizar las probetas que conformaron el material compuesto.



Figura 62: Fibras de henequén cortadas a 4 mm.



Figura 63: Vaciado del caucho de silicón y agregado del catalizador



Figura 64: Vaciado de fibras en la mezcla



Figura 65: Vaciado de la mezcla en el molde



Figura 66: Expansión de la mezcla en el molde



Figura 67: Conformación del caucho de silicón con la fibra de coco y de henequén

4.7 CONFORMACIÓN DE PROBETAS

Durante la segunda etapa se analizó la fibra de henequén y la fibra de coco por presentar en estudios anteriores mayor resistencia a la tensión y un mayor módulo de elasticidad.

El henequén y la fibra de coco se contemplaron en dos presentaciones, como hilos y cable, tomando en cuenta diámetros, número aproximado de fibrillas y su longitud. Se presentaron 3 muestras de cada tipo de fibra, con un hilado doble. (en forma helicoidal) Por consiguiente se realizaron dos probetas a base de caucho de silicón, en las cuales se incluyeron las fibras de henequén y coco de forma separada, esto con el objetivo de comprobar la adherencia que se tiene entre la resina y la fibra de henequén.

Para la elaboración de las probetas fue necesario desfibrar el cable de henequén y la fibra de coco (Figura 68 y 69) para constituir probetas uniformes, con el mismo número de fibras y tomando su longitud promedio.



Figura 68: Hoja de fibra de coco



Figura 69: Desfibración de la hoja para extraer las fibras en mejores condiciones



Figura 70: Cable de fibra de henequén



Figura 71: Hilos de fibra de henequén



Figura 72: Configuración de la probeta de fibra de henequén (doble)



Figura 73: Fibras de coco



Figura 74: Configuración de la probeta de fibra de coco (doble)

En las figuras anteriores (Figura 70-74) se puede observar el proceso a llevar a cabo para realizar las probetas conformadas por fibra de coco y de henequén.

Se emplearon 40 fibras de coco con una longitud de 30 cm. aproximadamente y 40 fibras de henequén de 30 cm. de longitud cada una.

Se planteó efectuar las pruebas de resistencia a tensión utilizándola infraestructura del Instituto de física de la UNAM para comprobar su fuerza, estabilidad y elasticidad de las dos fibras propuestas (de coco y henequén)

Por último se realizaron 20 probetas de fibra de henequén, empleando 40 fibras y tejiendo helicoidalmente en 2 grupos (de 20 fibras cada grupo) cada una de las probetas.

Para la realización de las probetas de tejido se utilizó un solo hilo de fibra de henequén empleando el tejido de punto (Figura 75) y para el tejido tipo tafetán (Figura 76) se cortaron dos secciones (urdimbre y trama) de una tela de henequén con este tejido.



Figura 75: probeta con tejido de punto



Figura 76: probeta con tejido tipo tafetán

4.8 CONSIDERACIONES PARA LA PRUEBA A TENSIÓN:

A partir de la prueba a tensión se conocerá la resistencia, modulo de Young y ductilidad de la fibra.

El primer paso es corroborar el espesor y longitud de la fibra a analizar, se requiere conocer la capacidad de las fibras para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, sus deformaciones, es decir los limites que podría soportar y para esto se empleará la máquina de pruebas universales shimadzu AG-100 KNG.

Al realizarse la prueba a tensión, los datos que se registren deberán incluir la carga o fuerza como una función del cambio de longitud, esta información se convertirá de manera subsecuente a esfuerzo y deformación. Posteriormente se deberá analizar la curva esfuerzo- deformación unitaria para conocer las propiedades del material.

A partir de ello se determinará si es necesario reforzar el cable con un mayor número de fibrillas, y si la fibra ha de incluir algún tipo de resina o cera que le de la estabilidad necesaria. De resultar lo contrario y la fibra se encuentre demasiado débil, se tendría que descartar su utilización como elemento estructural primario, siendo de primordial importancia utilizarse la fibra ayudándose de algún otro material o elemento que la refuerce.

4.8.1 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA

Se llevo a cabo una prueba a tensión de dos grupos de fibras (henequén y coco) conformados por 3 probetas cada uno, empleando los siguientes aparatos e instrumentos:

- Máquina de pruebas universales Shimadzu AG-100 KNG
- Panel digital
- Autograph control software, shimadzu versión 2.2

- Vernier
- 3 probetas de fibra de coco
- 3 probetas de fibra de henequén

Los pasos a seguir para llevar a cabo la prueba a tensión son los siguientes:

1. Se tomó la longitud y diámetro de cada espécimen utilizando un vernier
2. Primeramente se seleccionó modo manual en el panel digital de la máquina de pruebas y después se abrieron las celdas de desplazamiento para introducir el espécimen en las mordazas.
3. Se ajustaron las mordazas procurando que el espécimen # 1 de fibra de coco, quedara sujeto por debajo de las cintas
4. Se calibró la máquina en ceros (esfuerzo y desplazamiento)
5. En el software de la computadora se abrió un nuevo archivo el cual contiene el nombre de la fibra, el número de espécimen y su diámetro y se dio la velocidad de extensión que se le daría al espécimen, en este caso fue de 6 mm por minuto.
6. Se comenzó la prueba mediante un botón de inicio en el software y el espécimen se comenzó a desplazar 6 mm. por minuto.
7. La prueba finalizó cuando el espécimen registró una caída larga en el registro de datos en la computadora.

De esta forma sucesivamente, se fueron probando los demás especímenes, incluyendo los de fibra de henequén y los tejidos. El software fue el encargado de registrar los datos que incluyen el cambio de longitud y el esfuerzo aplicado.

En la tabla 10 se observa la longitud y diámetro de cada espécimen antes de realizarles la prueba.

FIBRA	# DE ESPECIMEN	LONGITUD (cm.)	DIAMETRO (mm.)
Coco	1	17.13	1.54
	2	18.37	1.80
	3	18.49	1.60
Henequén	1	18.41	1.10
	2	18.45	0.80
	3	18.36	0.90

Tabla 10: Longitud y diámetro de los especímenes de fibra de coco y henequén

Después de las primeras pruebas, se determinó que la fibra de henequén presenta mejores propiedades mecánicas comparándola con la fibra de coco, los resultados de dichas pruebas se describen en el apartado de análisis de resultados, por tal motivo se continuó trabajando únicamente con la fibra de henequén.

Conociendo la fibra a emplear, se procedió a realizar una prueba a tensión a 20 probetas de henequén conformadas por 40 fibras entrelazadas cada una. Se siguieron los mismos pasos descritos con anterioridad para la efectuar la prueba.

A continuación se menciona la longitud y diámetro de cada probeta de henequén antes de ser sometidas a la prueba:

# DE ESPECIMEN	LONGITUD (cm.)	DIAMETRO (mm.)
1	25.5	0.72
2	26.1	1.00
3	26.0	1.16
4	26.0	1.10
5	26.0	1.20
6	25.7	1.10
7	26.0	1.38
8	25.8	1.00
9	26.0	1.24
10	25.6	1.20
11	26.0	1.80
12	25.8	1.12
13	25.9	1.20
14	25.7	1.19
15	25.6	1.15
16	25.6	1.15
17	24.6	1.20
18	25.0	1.20
19	25.6	1.30
20	25.8	0.90

Tabla 11: Longitud y diámetro para especímenes de fibra de henequén

A partir de esto, se sometieron a una última prueba a tensión los tejidos que en base a la experiencia en la elaboración de maquetas resultaron más eficientes.

Estos fueron el tejido de punto y el tejido de tafetán. En la siguiente tabla se mencionan las medidas de cada espécimen antes de someterse a la prueba.

# DE ESPECIMEN	LONGITUD (CM.)	ANCHO (CM.)	DIAMETRO (MM)
Tejido de punto (trama) #1	18.5	5.0	.5
Tejido de punto (urdimbre) #2	19.7	5.0	.5
Tafetán urdimbre (1)	22.0	4.0	1.0
Tafetán trama (2)	22.0	4.0	1.0

Tabla 12: Medidas de los especímenes tejidos

4.9 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

Durante la primera etapa de experimentación se ha propuesto realizar pruebas a las fibras de henequén y de coco, las cuales representan las primeras dos variables y se relacionan por constituir el material propuesto a base de fibras naturales que han resultado ser muy resistentes y elásticas en otras investigaciones.

Para efectuar las pruebas a dichas fibras es necesario conocer su espesor y longitud inicial, relacionándose como los parámetros de medición.

A partir de ello se podrá llevar a cabo la prueba a tensión en donde se registrará el cambio de longitud y la fuerza aplicada, valores necesarios para el cálculo de esfuerzo y deformación.

Conociendo el esfuerzo y deformación se establece una relación de la cual se deriva el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión, estas últimas representan las propiedades que dictaran si el material funciona o no como elemento constructivo. Se empleará el paraboloides hiperbólico como geometría para constituir la cubierta tensada relacionándose con el diseño de la red que cubrirá el espacio, dichos factores son los que le darán forma a la propuesta arquitectónica planteada inicialmente.

Al plantear los diferentes factores que intervienen durante la realización de la experimentación se le da un orden a la misma para concretar resultados coherentes en las diferentes etapas.

4.9.1 RELACIÓN DE VARIABLES A EXPERIMENTAR

En la siguiente tabla se observa la relación existente entre variables, mediante las cuales se podrá llegar a diferentes resultados que conformaran las piezas para lograr el objetivo principal de esta investigación.

Análisis de la prueba	Datos a registrar de la fibra de coco y la fibra de henequén
Espesor de la fibra	Longitud de la fibra
Fuerza aplicada	Cambio de longitud de la fibra
Esfuerzo ingenieril	Deformación ingenieril
Módulo de elasticidad	Resistencia a la tensión
Paraboloide hiperbólico	Diseño de la red

Tabla 13: Relación de variables para la realización del experimento

Dichas relaciones son necesarias para la obtención de diferentes resultados, que en conjunto lograrán alcanzar el objetivo empleado al inicio de esta investigación.

Las variables planteadas se han relacionado en pares tomando en cuenta su función, contemplando tiempos y ejecución de datos y resultados necesarios para continuar, el orden de las mismas se ve afectado al no concretar resultados de las anteriores. Se inicia analizando el material y se finaliza proponiendo la geometría.

4.9.2 FUNCIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES

La fibra de henequén y la fibra de coco tienen como fin demostrar cual presenta la mayor resistencia a tensión y elongamiento a la ruptura para proponerla como material fundamental en los prototipos de la cubierta.

El siguiente paso será la prueba a tensión, la cual se utiliza para determinar algunos valores necesarios y así efectuar la curva esfuerzo-deformación, además es importante conocer estos datos debido a que al realizar los prototipos de entramado de la cubierta se han de marcar con claridad las dimensiones de la cuerda a partir de las fibras, ya que esto regirá la construcción de la cubierta, por otra parte será necesario realizar 2 pruebas a cada una de las fibras, una presentándose un hilo de la fibra y otra con un conjunto de hilos mostrando un cable.

Por consiguiente se requiere realizar una prueba a tensión la cual registrara datos que incluyan la fuerza como una función del cambio de longitud, a partir de ello deberá realizarse un promedio de la longitud la fibra, tomando en cuenta el área que pierde al aplicarse la fuerza de tensión.

Dichas variables mencionadas anteriormente sirven para calcular el esfuerzo y la deformación, el esfuerzo nos hace saber el valor del resultado entre la fuerza aplicada a la fibra y el área de la sección transversal antes de que comience la prueba y la deformación funciona para sacar el valor del cambio de longitud de la fibra después de la fuerza aplicada entre la distancia original de la marca calibrada y es a partir de el conocimiento de

estos dos valores que pueden graficarse e indicarse el módulo elástico de la fibra, el rango de su estiramiento elástico y en qué punto alcanza el límite elástico.

El módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión forman el siguiente conjunto de variables. Su importancia radica en que al conocer el módulo de elasticidad se conoce la capacidad elástica que tiene la fibra sin romperse y si su valor se encuentra en un rango seguro para que se pueda utilizar como material de construcción, al igual que la resistencia a tensión, la cual nos permite saber ante qué valor de fuerza aplicada más alta el material puede resistir sin romperse.

Se ha planteado utilizar el paraboloides hiperbólico como geometría constitutiva para la posible construcción de una cubierta tensada a partir de fibras naturales, dicha geometría, es decir el paraboloides, representa otra variable y está relacionada con el diseño del entramado de la red, la geometría y la red sirve para conformar el prototipo de la cubierta tensada, además su función es analizar el entramado para lograr una longitud considerable a manera de experimento para poder utilizarse a una escala real. Una vez analizados los modelos se concluirá el tipo de entramado que mejor trabaja empleando el paraboloides.

4.10 RESULTADOS

1. De acuerdo a los 3 modelos de tejido que se realizaron, se observó en el prototipo 1 un comportamiento muy elástico en el tejido, con zonas donde se presentan agujeros más amplios que en otras partes, comparándolo con el prototipo 2, el cual resultó más rígido, mientras que el diseño permite que se forme un menor número de agujeros. Respecto al prototipo 3, la red primaria presenta una buena estabilidad, mientras que la red secundaria se torna más difícil de tensar y de quedar lo suficientemente rígida.

2. Comparando el tercer prototipo con los dos primeros, se requiere un mayor número de apoyos (postes) en el tercero, que en los otros dos. La colocación de un quinto apoyo le aporta mayor estabilidad a la estructura, sin embargo se podría lograr el realizar la geometría del paraboloides hiperbólico sin la necesidad de este quinto apoyo, si bien se colocó, fue por la condición que establece la araña al tejer su red, dicha condición establece que a partir de una “Y” se teje el resto de los hilos primarios y secundarios y para conformarla era necesario un quinto apoyo en medio de dos de los postes.



Figura 77: Prototipo ilustrativo para cubierta 1



Figura 78: Prototipo ilustrativo de cubierta 1, vista aérea

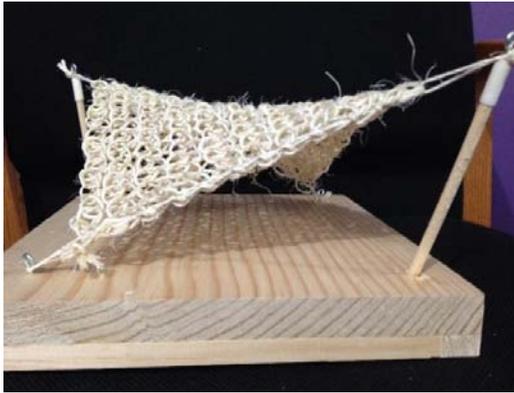


Figura 79: Prototipo ilustrativo de cubierta 2

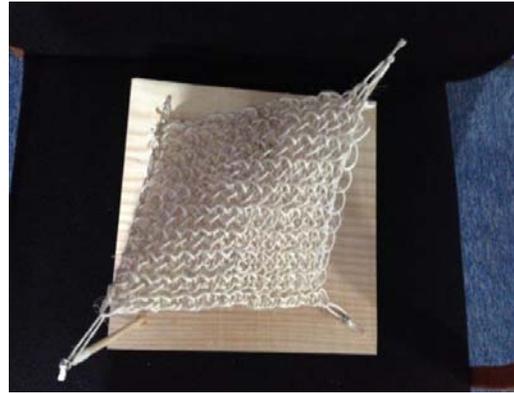


Figura 80: Prototipo ilustrativo para cubierta 2, vista aérea

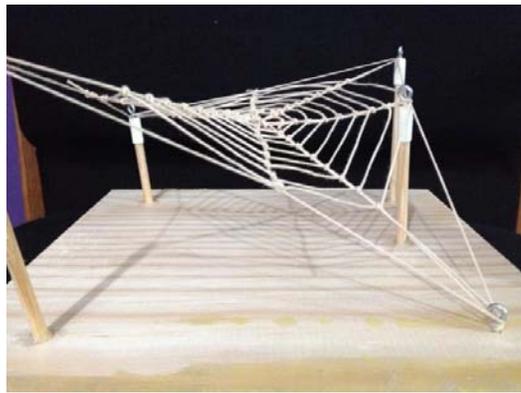


Figura 81: Prototipo ilustrativo de cubierta 3

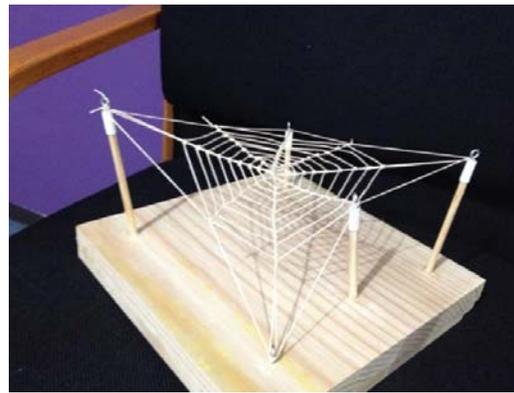


Figura 82: Prototipo ilustrativo de cubierta 3, vista aérea

En cuanto a la incorporación de tensores en la red de tejido de punto, estos aportan una mayor rigidez y estabilidad al mismo, siendo la estructura principal de la cubierta. En la figura 83 se observa el prototipo de cubierta 2 con los tensores tejidos por dentro de la red.

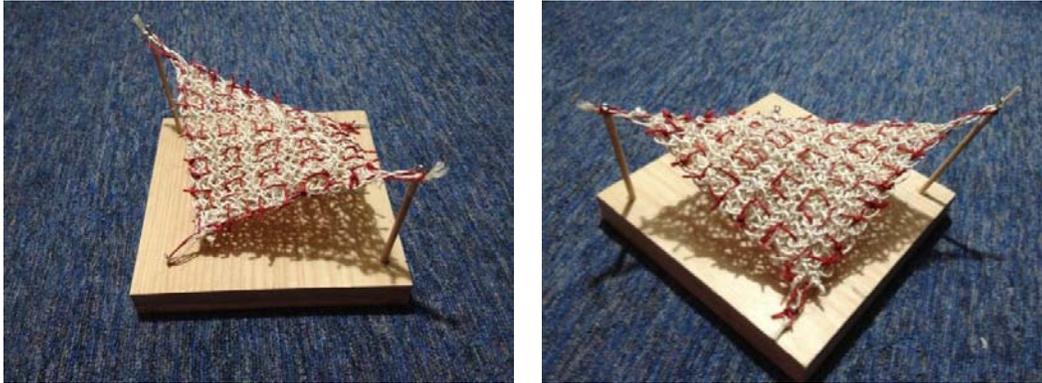


Figura 83: Tensores en el prototipo de cubierta 2

A fin de comprobar la compatibilidad de las fibras naturales propuestas con otros materiales que le brinden mayor rigidez y protección a las fibras, se realizaron dos pequeños experimentos en el cual se le añadió al caucho de silicón fibra de coco y henequén.

El caucho de silicón con fibras naturales presento una buena adherencia entre ambos materiales, creando una posibilidad sobre su uso como cubierta, sin embargo no se logra el principal objetivo planteado en esta investigación, es decir que el material de la cubierta sea 100% de fibra natural, al emplear el caucho de silicón se elimina ese porcentaje de fibra natural, dejándola de lado y siendo el caucho de silicón el material principal, no obstante en futuras investigaciones puede continuar el estudio sobre el diseño e implementación de fibras con compuestos plásticos.

En la figura 84 se observa el modelo de cubierta conformada por trozos de fibra de coco y de fibra de henequén de 4 mm. de longitud con el caucho de silicón.



Figura 84: Retícula de caucho de silicón con fibra de henequén y de coco

Al llevar a cabo la prueba a tensión, se observó que el primer espécimen de fibra de coco era sensible a la ruptura en la parte superior e inferior de la probeta e igualmente para los otros dos, en la secuencia de abajo (Figura 85) se observan las tres probetas en su último esfuerzo a tensión.



Figura 85: Esfuerzo último a tensión de los especímenes de fibra de coco

En los especímenes de fibra de henequén (Figura 86), en la probeta 1 y 3 el rompimiento se efectuó en la parte superior e inferior, en el caso de la segunda probeta, la fractura fue en la parte media.

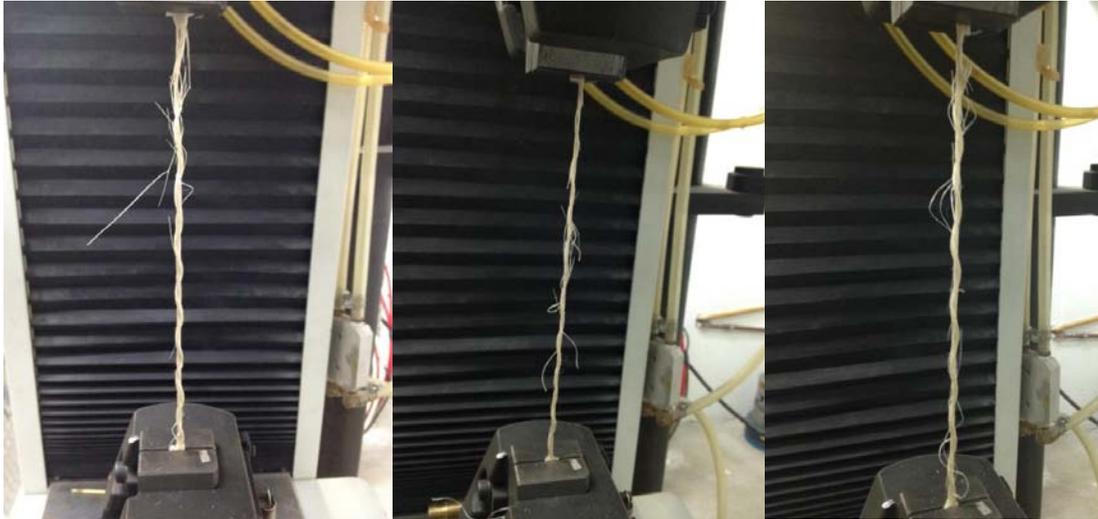


Figura 86: Esfuerzo último a tensión de los especímenes de fibra de henequén

Los resultados preliminares de la fibra de coco y henequén arrojados por el software fueron los siguientes:

FIBRA	# DE ESPECIMEN	ESFUERZO (Kg/cm ²)	LONGITUD INICIAL (cm.)	LONGITUD FINAL (cm.)
Coco	1	862.9	17.13	18.46
	2	556.3	18.37	19.88
	3	906.9	18.49	19.57
Henequén	1	2,857.9	18.41	20.33
	2	4,847.7	18.45	19.59
	3	4,551.6	18.36	19.54

Tabla 14: Esfuerzo último de las fibras y cambio de longitud

En la tabla 14 se observan los dos grupos de fibras y el número de cada espécimen, el esfuerzo al que fue sometido en su resistencia última a tensión y el cambio de longitud, tomando la inicial y la final antes de la ruptura.

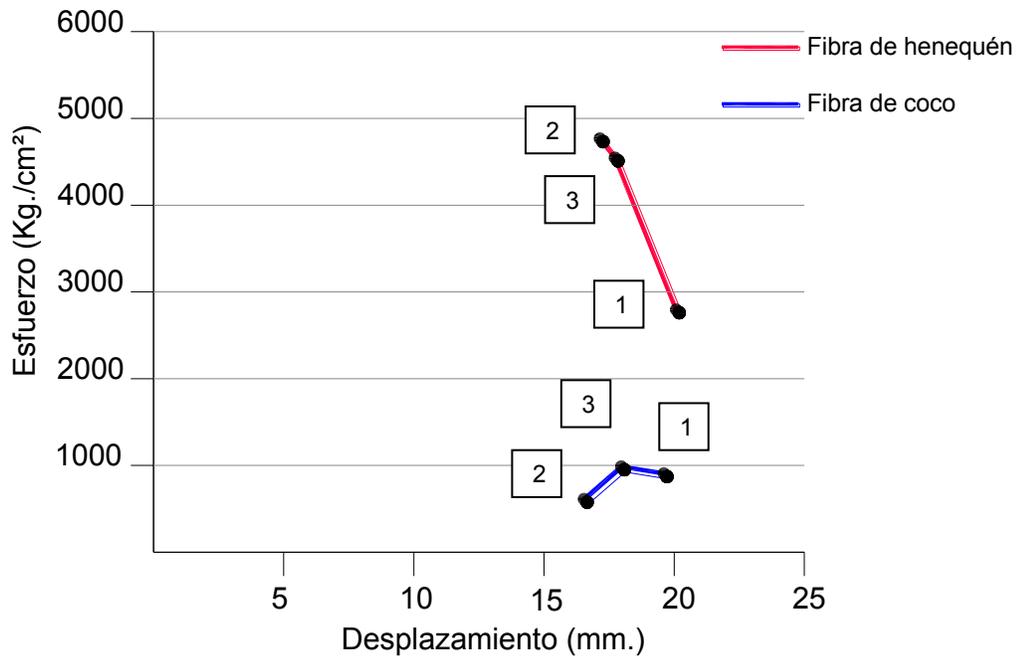


Figura 87: Gráfico de desplazamiento y esfuerzo aplicado en las probetas de henequén y coco.

En la figura 87 se observa una comparativa entre los valores de esfuerzo y desplazamiento de las fibras, haciéndose notable una mayor resistencia a esfuerzo en la fibra de henequén, mientras que los valores de desplazamiento (elongación) permanecen similares, sin embargo el desplazamiento más largo se registró en la probeta #1 de la fibra de henequén.

En promedio, la fibra de coco tiene una resistencia a tensión de 775.36 Kg/cm², mientras que la fibra de henequén, tiene una resistencia de 4,085.73 Kg/cm².



Figura 88: Especímenes de fibra de coco después de la prueba

En la figura 88 se observan los especímenes de fibra de coco después de la prueba, después de ser sometidos a su último esfuerzo a tensión y en la figura 89 se presentan los especímenes de fibra de henequén después de la prueba.



Figura 89: Especímenes de fibra de henequén después de la prueba

Como se observa en la figura 88, los especímenes de fibra de coco sufrieron un rompimiento más drástico en comparación con los de fibra de henequén en la figura 89, a pesar de que la fibra de coco tiene un diámetro mayor que la fibra de henequén, estos resultaron más sensibles a la ruptura.

Por lo anterior, se utilizará la fibra de henequén para aplicarle la prueba a tensión contemplando los 20 especímenes como lo dicta la norma ASTM D-3822.

En las siguientes figuras se observa la gráfica esfuerzo-deformación y la zona elástica del promedio de los 20 especímenes probados, señalando su esfuerzo a límite elástico, su resistencia última a deformación y resistencia a la fractura.

Es importante mencionar que las fibras no presentan una deformación plástica al no tener ningún tratamiento químico o manipulación de materiales, la fibra es natural en su totalidad.

Cada una de las caídas en los puntos anteriores al esfuerzo a límite elástico está relacionada con la sensibilidad del equipo en el cual se realizó la prueba, sin embargo después del punto donde se encuentra la resistencia última a deformación las fibras comienzan a romperse una por una, no obstante, el esfuerzo sigue aumentando debido al grupo de fibras que siguen sin romperse, tomando en cuenta que cada probeta estaba conformada por un grupo de 40 fibras entrelazadas, esto explica las bajadas y subidas de resistencia a tensión que fueron registradas durante la prueba.

En la tabla 15 se observan los 20 especímenes y los valores más altos de resistencia y elasticidad registrados en cada uno de ellos, la fibra #1 alcanzó una resistencia a fractura de 5,764 Kg/Cm² y un módulo de elasticidad de 145,841.71 Kg/Cm², mientras que en la fibra # 11 la resistencia a fractura fue de 1187.94 Kg/Cm² y el módulo de elasticidad de 27,706.54.

Dichas variaciones entre una fibra y otra tienen que ver con la influencia del diámetro y longitud y la forma de la sección transversal de la misma, es por ello que la norma ASTM D-3822 solicita el emplear 20 especímenes para la prueba a tensión, con la finalidad de promediar cada una de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de cada fibra.

El promedio entre las 20 fibras arrojó una resistencia a fractura de 2,604.65 Kg/cm² y un módulo de elasticidad de 65,109.60 Kg/cm².

	Resistencia última a deformación (Kg/Cm ²)	Resistencia a fractura (Kg/Cm ²)	Deformación a fractura	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo a límite elástico (Kg/Cm ²)	Módulo de elasticidad (Kg/Cm ²)
Fibra #1	5732.00	5764.30	0.04102	20.54	5137.74	145,841.71
Fibra #2	3329.26	3377.98	0.04076	18.64	3166.00	82,857.51
Fibra #3	2124.17	2160.38	0.03231	17.77	1448.00	66,851.55
Fibra #4	3167.52	3301.74	0.04157	16.55	3006.46	79,422.48
Fibra #5	2075.14	2120.26	0.03857	16.66	2052.59	54,958.44
Fibra #6	2603.81	2536.70	0.03705	12.217	2536.70	68,450.85
Fibra #7	1782.30	1824.94	0.04692	15.975	1560.00	38,893.65
Fibra #8	3280.00	3410.46	0.04651	14.47	3183.09	73,319.77
Fibra #9	1880.05	1922.30	0.04192	16.245	1584.31	45,847.64
Fibra #10	1872.14	2176.65	0.03771	14.535	1804.47	57,706.29
Fibra #11	1167.89	1187.94	0.04287	14.72	1147.84	27,706.54
Fibra #12	2757.64	3003.62	0.04095	13.085	2744.69	73,332.17
Fibra #13	2390.93	2402.21	0.03687	13.285	2323.26	65,141.58
Fibra #14	2110.17	2224.85	0.04256	13.155	2006.95	52,265.20
Fibra #15	2112.16	2173.56	0.03219	10.195	2075.32	67,502.33
Fibra #16	1768.32	1903.40	0.03589	12.03	1240.28	53,020.89
Fibra #17	2131.53	2345.82	0.04584	13.54	1421.02	51,171.03
Fibra #18	2266.87	2300.70	0.04267	14.325	1962.36	53,918.65
Fibra #19	1835.44	1845.05	0.04021	14.135	1825.83	45,878.15
Fibra #20	3749.30	4110.19	0.04189	14.17	3749.30	98,105.51
PROMEDIO	2506.83	2604.65	0.04	14.81	2298.81	65109.60

Tabla 15: Resultados de la prueba a tensión de las fibras de henequén

Por otra parte, se llevó a cabo una prueba a tensión a los diferentes tejidos que resultaron ser apropiados para la cubierta en la sección de los modelados.

Primeramente se probaron los especímenes con tejido de punto en el sentido de la trama(1) y urdimbre(2) tomando en cuenta que el tejido se realizó utilizando una sola fibra de henequén como hilo y fueron arrojados los siguientes resultados:

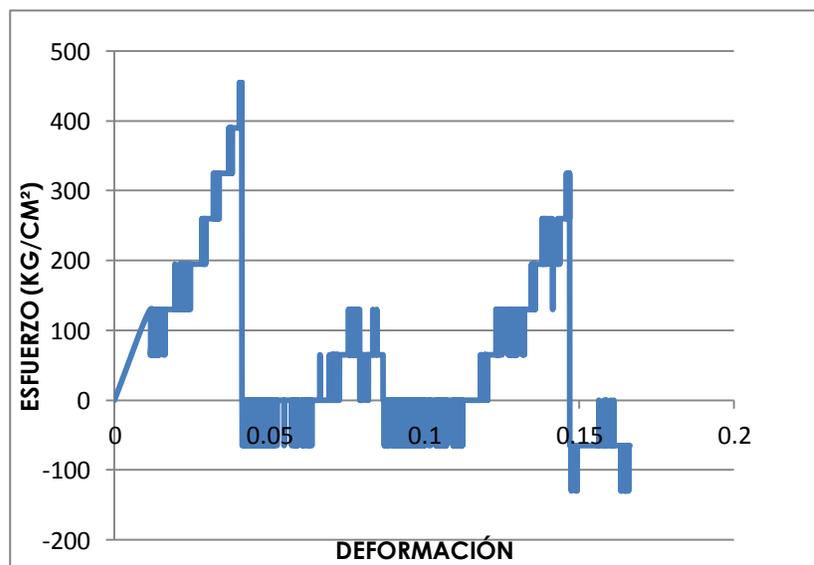


Figura 90: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de punto #1

Se observa que el tejido en sentido de la trama alcanzó una resistencia a fractura de 454.72 Kg/cm² y un módulo de elasticidad de 11,189.77 Kg/cm², en la gráfica se observa que el tejido sufrió un gran número de caídas, es decir de roturas en las fibras a medida que avanzaba la prueba hasta alcanzar su límite. La resistencia a fractura fue tomada en el punto más alto de esfuerzo antes de que la fibra se rompiera en su totalidad.

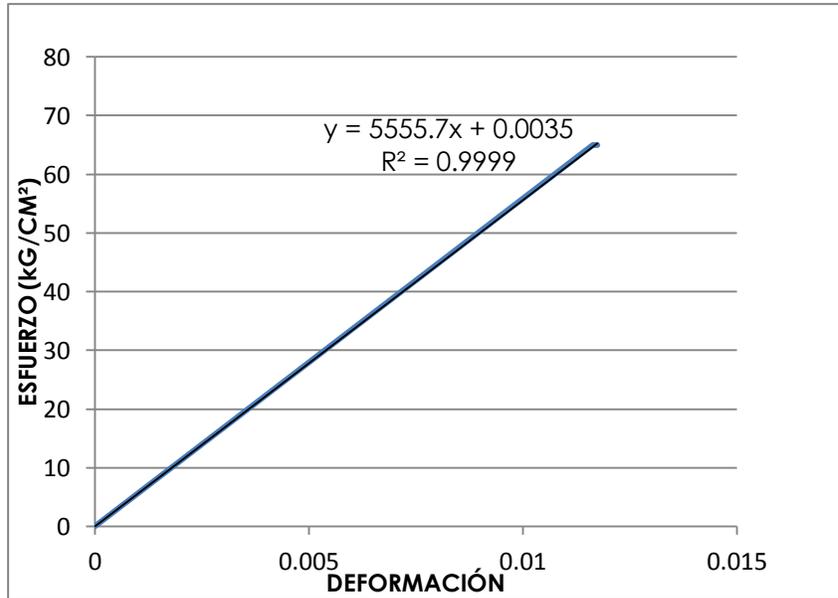


Figura 91: Gráfica de zona elástica para el tejido de punto #1

En la zona elástica se tomó la primera carga que se registró sin que el tejido tuviera alguna caída, en este caso fue de 64.96 Kg/Cm².

En el tejido de punto #2, el de la urdimbre los resultados fueron los siguientes:

Su resistencia a fractura fue de 454.72 Kg/Cm² y el módulo de elasticidad de 5,677.71 Kg/Cm², comparando este tejido con el #1, en este se registran más caídas que en el primero, teniendo 6 contra 5 hasta llegar a su punto de esfuerzo máximo antes de romperse por completo.

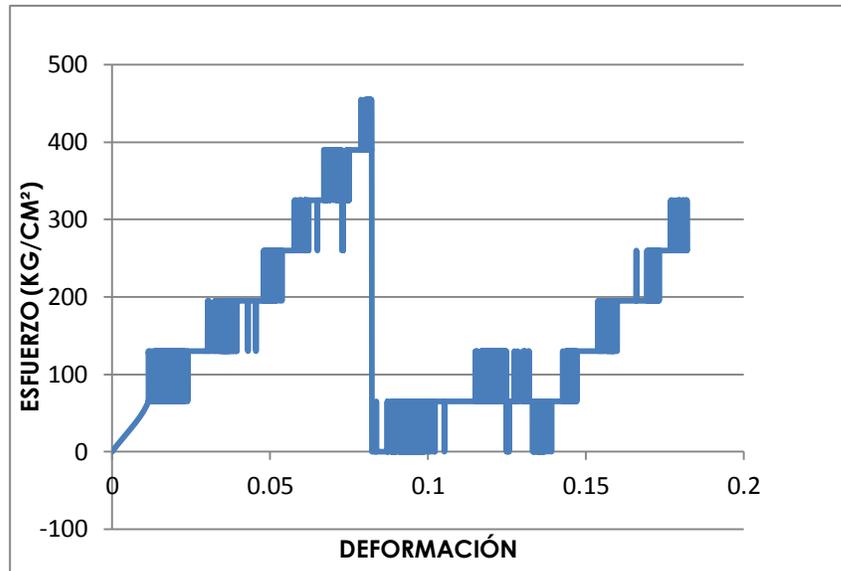


Figura 92: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de punto #2

Los dos tejidos presentaron el mismo valor de resistencia a fractura, sin embargo el módulo de elasticidad cambió, siendo el del tejido #1 (trama) mayor que el tejido #2. Esto se debe a que las telas no presentan las mismas propiedades elásticas en un sentido y en el otro, teniendo toda la intervención del tipo de tejido.

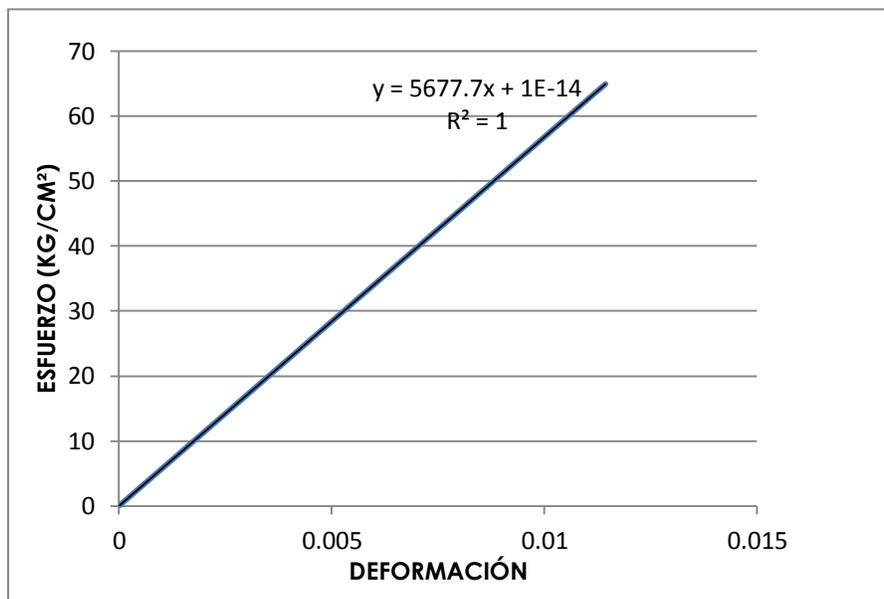


Figura 93: Gráfica de zona elástica para el tejido de punto #2

La siguiente prueba se le aplicó al segundo tipo de tejido tafetán, en dirección de urdimbre y los valores registrados fueron los siguientes:

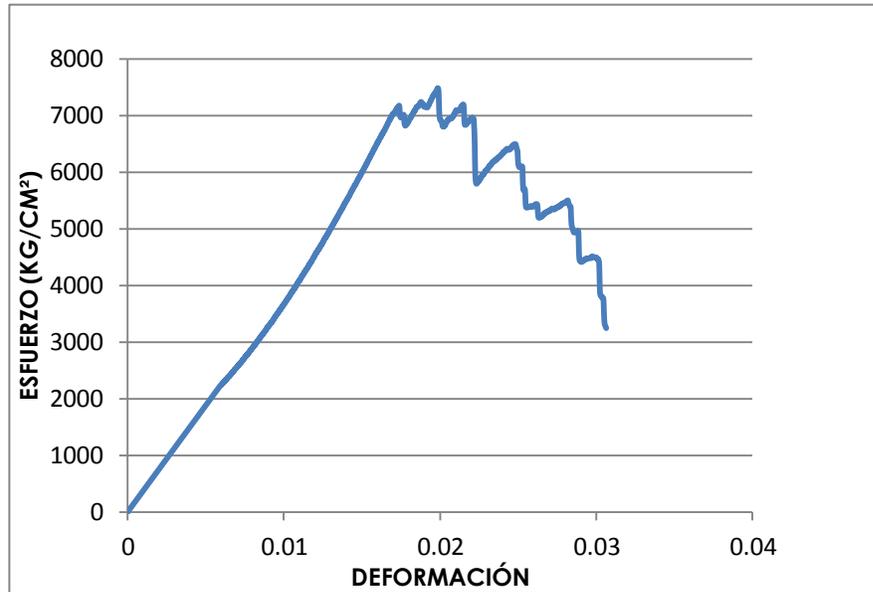


Figura 94: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de tafetán #1

Se registró una resistencia a fractura de 7,421.82 Kg/Cm² y un módulo de elasticidad de 376,153.22 Kg/Cm², en esta gráfica se observa que la curva esfuerzo-deformación fue más uniforme que las curvas para el tejido de punto, esto se relaciona a que en el tejido tipo tafetán los hilos estaban conformados por grupos de aproximadamente 70 fibras, es por ello que también los valores de resistencia a tensión y módulo de elasticidad se superan en gran medida, esto también se atribuye al tipo de tejido.

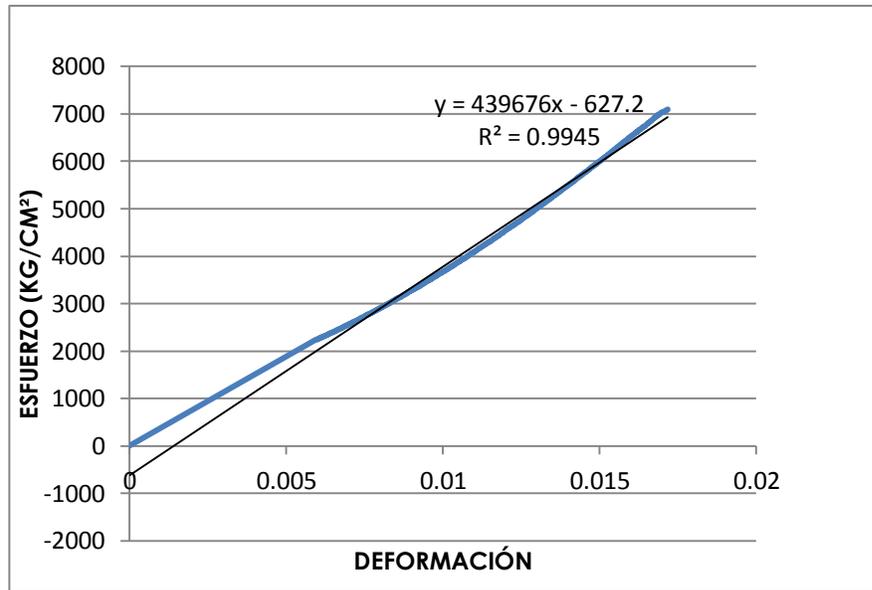


Figura 95: Gráfica de zona elástica para el tejido de tafetán #1

En cuanto a la última prueba, el tejido tafetán # 2 registró los siguientes valores:

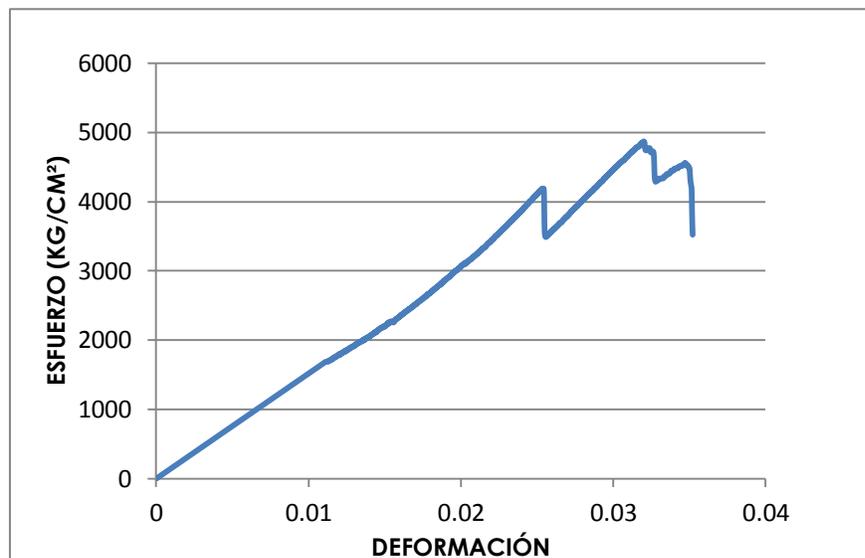


Figura 96: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de tafetán #2

Se puede observar que el valor de resistencia a fractura registrado en esta prueba fue de 4,839.60 Kg/cm² y un módulo de elasticidad de 151,837.02 Kg/cm², estos valores son menores, comparándolos con los del tejido #1 de tafetán en dirección de urdimbre.

Al igual que el resultado en el espécimen #1 del tejido de punto en dirección de trama, el tejido crochet también obtuvo su mayor valor en módulo elástico en la trama.

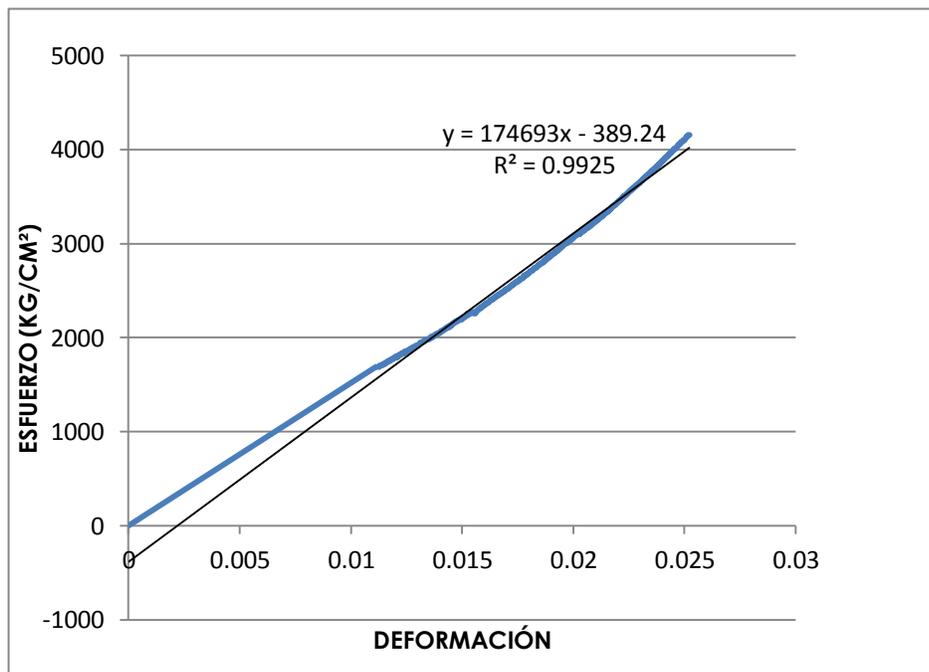


Figura 97: Gráfica de zona elástica para el tejido de tafetán #2

Comparando los resultados anteriores (de los tejidos) con las cubiertas empleadas convencionalmente en la construcción de tensoestructuras, se observa que el tejido tafetán obtuvo una mayor resistencia a tensión comparándolo con los tejidos sintéticos. El tejido tafetán es apto para la conformación de una cubierta.

En cuanto al tejido de punto, este aumentaría su resistencia a tensión si se empleara más de una fibra en la realización del tejido, como ya se ha

mencionado, el número de fibras es vital para obtener resultados satisfactorios al realizar una prueba a tensión.

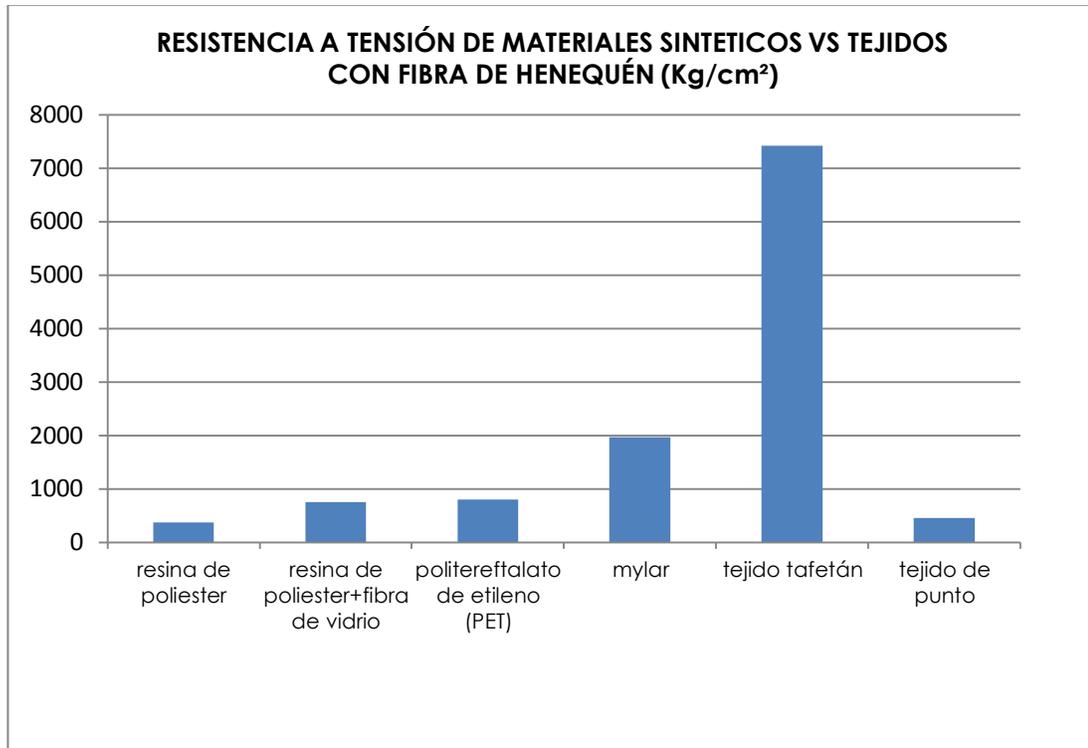


Figura 98: Resistencia a tensión de los materiales sintéticos y tejidos con fibra de henequén (Sanchez Sierra 2006)

Respecto al módulo de elasticidad, (Figura 99) el del tafetán supera por mucho al módulo de las fibras sintéticas y el tejido de punto tiene un módulo elástico relativamente elevado tomando en cuenta las condiciones con las cuales fue confeccionado, a pesar de ello, su módulo elástico supera al de la resina de poliéster.

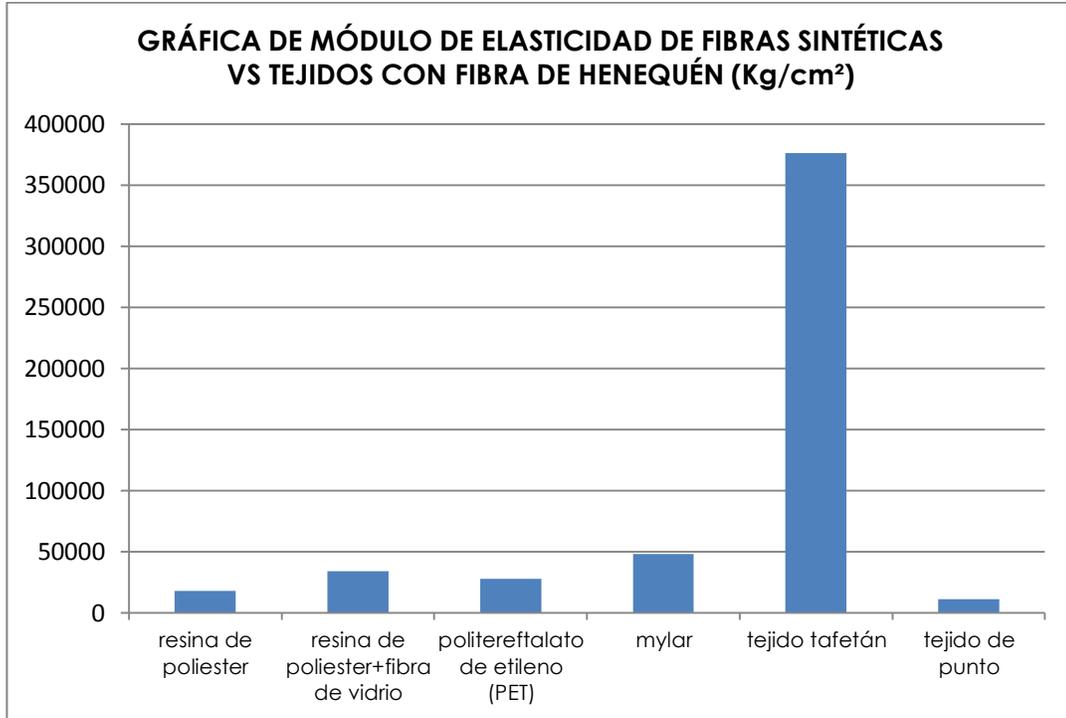


Figura 99: Gráfica de módulo de elasticidad de fibras sintéticas y tejidos con fibra de henequén (Sanchez Sierra 2006)

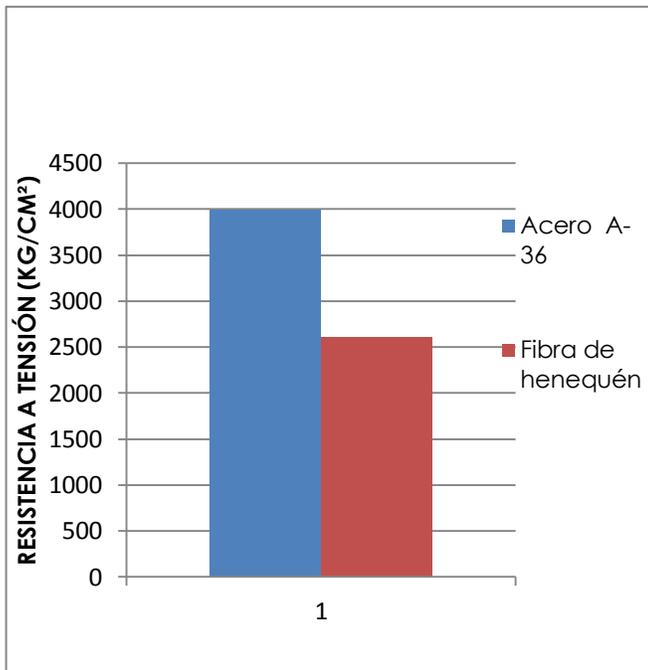


Figura 100: Gráfica de resistencia a tensión del acero A-36 y de la fibra de henequén

En la figura 100 se observa una comparativa entre los valores de resistencia a tensión entre el acero A-36 y el promedio obtenido de la prueba a tensión en las probetas de fibra de henequén, se observa que el acero tiene una mayor resistencia. El propósito de esta comparativa es verificar si las fibras pudieran llegar a sustituir a los tensores de acero utilizados en las tensoestructuras.

Respecto al módulo de elasticidad, (Figura 101) el presentado en la fibra de henequén es superior al del acero A-36, se hace evidente que una fibra natural puede elongarse más que el acero antes de romperse.

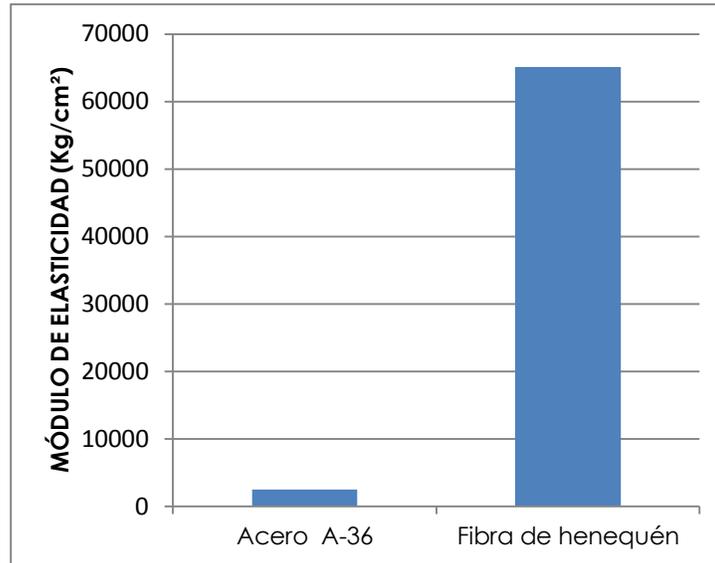


Figura 101: Gráfica de módulo de elasticidad del acero A-36 y de la fibra de henequén

En la figura 102 se observa una comparativa entre los valores de resistencia a tensión y módulo de elasticidad de la fibra de henequén consultada en otras investigaciones contra la fibra de henequén probada en este trabajo. En el primer caso se obtuvo un valor de 6000 kg/cm² en resistencia a la tensión y de 122,000 kg/ cm² en el módulo de elasticidad y en el segundo caso, obtuvo una resistencia a tensión de 2604.65 kg/ cm² y módulo de elasticidad de 65,109.60 kg/ cm².

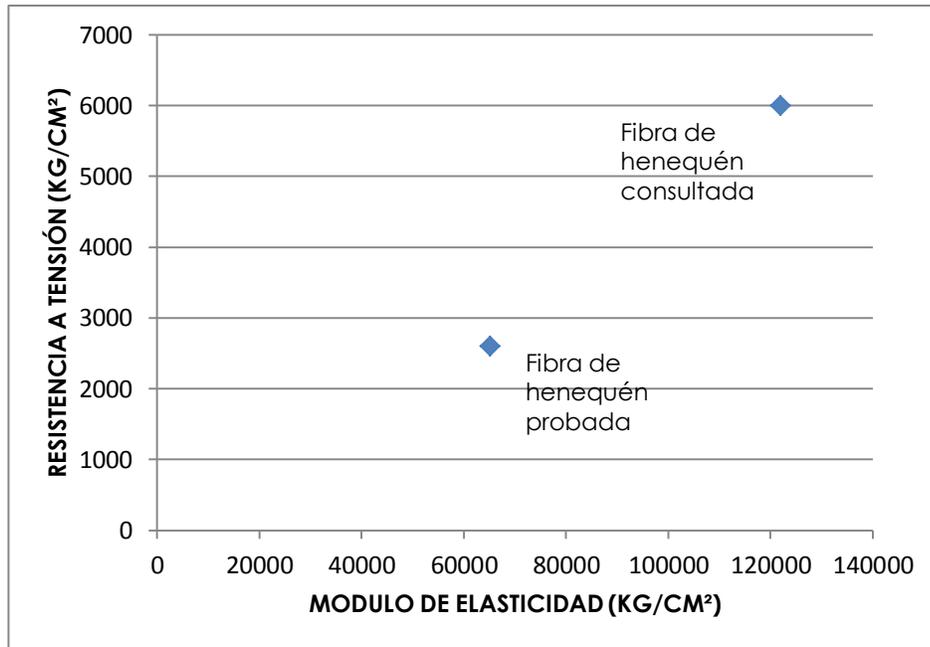


Figura 102: Gráfica comparativa de las propiedades mecánicas del henequén en investigaciones consultadas y la fibra probada

CONCLUSIONES

1. A partir de los análisis de geometría, el paraboloides es más estable pero requiere de mayores esfuerzos de pretensado que eviten el aflojamiento de las cuerdas de la membrana, a diferencia del conoide que requiere de refuerzo en las proximidades de los vértices al haber una mayor variación en los esfuerzos de pretensado.
2. En cuanto a las fibras, el henequén presenta una mayor resistencia a la tensión en comparación con la fibra de coco, un dato diferente al consultado en la literatura.
3. El análisis de las propiedades mecánicas de las fibras son valores que determinaran su comportamiento y así poder conocer la deformación a la que estará expuesta.
4. Las probetas de fibra de henequén resultan ser fibras muy duras y más largas en longitud comparándolas con la fibra de coco, lo cual resulta viable ya que a una longitud original mayor de la fibra se facilita más el tejido de la cubierta a una escala superior.
5. El material compuesto resulto muy elástico y las fibras se adhieren perfectamente, a partir de ello se ha determinado que dicho material pudiera funcionar como cubierta encima del entramado (red) de fibras.
6. El diseño de la red se adapta a un paraboloides hiperbólico, ya que dependiendo de él, se le dará mayor estabilidad a la cubierta. Es necesario hacer los dobladillos necesarios en las orillas y los refuerzos en cada uno de los cuatro extremos de la red de donde se sujetaran los tensores.
7. El prototipo de cubierta 2 resultó más rígido y más consistente (con menor cantidad de agujeros) que el prototipo 1, sin embargo el prototipo 1 presenta una mayor elasticidad que el primero, en cuanto al tercer prototipo la red primaria resulto más estable que la red

secundaria, en la cual se dificulta el tensado del hilo al solamente tener por apoyo a la red primaria, en cambio esta última tiene la ventaja de encontrar un apoyo en cada uno de sus 5 puntos.

8. La fibra de henequén resultó más resistente que la fibra de coco, al alcanzar un desplazamiento de 19.24 mm. y un esfuerzo de 4,847.7 kg/cm², mientras que el valor más alto registrado en la fibra de coco fue un esfuerzo de 906.9 kg/cm² y un desplazamiento de 15.14 mm. respecto a su longitud original.
9. En cuanto a los tejidos, el tejido de punto en dirección a la trama tiene un mayor módulo de elasticidad y la misma resistencia a tensión en ambas direcciones, tomando en cuenta que las probetas para este tejido estaban conformadas por una sola fibra, resulta viable el construir con este tipo de tejido ya que al compararse con la resina de poliéster, sus valores de resistencia a tensión y módulo de elasticidad son similares..
10. Respecto al tejido de tafetán, este alcanzó un mayor módulo de elasticidad y resistencia a tensión en la urdimbre y relacionando este tejido con los materiales sintéticos utilizados para las cubiertas tensadas convencionales, el tafetán con fibra de henequén tiene un mayor módulo elástico y resistencia a tensión, por lo tanto puede ser uno de los tejidos más aptos para emplearse en cubiertas tensadas.
11. El empleo de tensores entretejidos con la cubierta aporta mayor estabilidad al sistema tensado, proporcionándole rigidez y resistencia. Además, la red de tensores forma la estructura de la cubierta y por consiguiente son los que le dan la forma del paraboloides hiperbólico.
12. El inconveniente en utilizar hilo de henequén en un sistema tensado, es que las fibras se van rompiendo una a una al aplicarle el esfuerzo; no presentan una deformación plástica al finalizar su deformación elástica, el hilo tiene una caída (ahí es cuando se rompe la primera fibra) sin embargo el material vuelve a recuperarse y sigue resistiendo a mayores esfuerzos y también se sigue desplazando; cuando se

rompe otra fibra, se registra otra caída y el hilo se recupera una vez más, y así sucesivamente hasta llegar al punto en el que las fibras se rompen y se registra una caída prolongada en la cual el hilo ya no se recupera.

Por lo tanto se requiere realizar un análisis del material para estimar su tiempo de vida, contemplando el comportamiento de hilo de henequén descrito con anterioridad.

13. Al comparar el hilo de henequén con el acero A-36, este último tiene una mayor resistencia a tensión, no obstante, se deberá realizar un diseño de tejido que funcione como tensor y por consiguiente, efectuar una prueba a tensión. Si con los hilos conformados por 40 fibras de henequén cada uno se obtuvo en promedio una resistencia a tensión elevada, es probable que la resistencia aumente en función de un tejido reforzado, como se vio en el segundo capítulo: propiedades físicas y mecánicas de la fibra de henequén.

En relación con el módulo elástico, este fue superado por la fibra de henequén, de esta forma puede corroborarse el alto índice de elasticidad de esta fibra.

14. Comparando el henequén que fue probado en esta investigación contra el de la literatura consultada, este último tiene un mayor módulo de elasticidad y resistencia a tensión. Existe una gran diferencia, sin embargo estos valores han variado en diferentes investigaciones sobre la fibra de henequén y no se especifica la condición de la probeta, es decir, número de fibras, longitud, número de probetas probadas y si se promediaron para constatar esos resultados.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Envolvente de una tienda tipi	01
Figura 02: Estructura interior y exterior de una tienda tipi	03
Figura 03: Antigua cubierta del coliseo romano	04
Figura 04:Tienda beduina típica	05
Figura 05: Cubierta tensada para el centro comercial bonaire	14
Figura 06: Tensoestructura con geometría cónica	15
Figura 07: Tipología de una cubierta velarfa	15
Figura 08: Componentes de un cable de acero.....	16
Figura 09: Forma de cono	19
Figura 10: Forma de silla de montar	19
Figura 11: Tensoestructura y los elementos climáticos	29
Figura 12: Estudio de cubiertas tensadas	35
Figura 13: Tribuna del circuito internacional de Shanghai	41
Figura 14: Cubierta star	42
Figura 15: Cubierta del estadio olímpico de Munich	44
Figura 16: Cubierta para el castillo de ferrara	45
Figura 17: Fieltro de cáñamo	63
Figura 18: Bloque de cáñamo	64
Figura 19: Variaciones en la sección transversal de una fibra de henequén	69
Figura 20: Tela de henequén con refuerzo	70
Figura 21: Curvas esfuerzo-deformación para diferentes secciones	71

Figura 22: Imágenes microscópicas de una fibra sin y con tratamiento NaOH	72
Figura 23: Puente Q'eswachaka	74
Figura 24: Estructura tensada de recreación para niños	77
Figura 25: Construcción de la red de la araña	79
Figura 26: Cubierta circular	81
Figura 27: Tensión radial como módulo principal	81
Figura 28: Líneas ortogonales tensadas	82
Figura 29: Diagrama de una cubierta radial	82
Figura 30: Deslizamiento del nodo	82
Figura 31: Tejido de punto en sus dos direcciones	84
Figura 32: Orientación de las fibras en materiales compuestos	86
Figura 33: Instalación de la prueba a tensión	96
Figura 34: Curva esfuerzo-deformación para un metal	97
Figura 35: Curvas esfuerzo-deformación para diferentes materiales	99
Figura 36: Máquina de pruebas universales Shimadzu	109
Figura 37: Panel digital Shimadzu	110
Figura 38: Autograph control software	110
Figura 39: Colocación de hilo perimetral	112
Figura 40: Colocación de hilos horizontales	112
Figura 41: Colocación de hilos secundarios	112
Figura 42: Modelo con geometría de arco	112
Figura 43: Modelo con geometría de conoide	114
Figura 44: Paraboloide hiperbólico a partir de una superficie cuadrada	115
Figura 45: Colocación del hilo dentro de la tabla.....	117

Figura 46: Diseño de entramado para el primer prototipo	117
Figura 47: Inicio del entramado.....	117
Figura 48: Segundo tejido en el entramado	117
Figura 49: Proceso de tejido del primer prototipo.....	118
Figura 50: Liberación del tejido en la tabla.....	118
Figura 51: Primer prototipo de cubierta.....	118
Figura 52: Entramado para el segundo prototipo	119
Figura 53: Trazado de entramado del lado opuesto	119
Figura 54: Tejido para el segundo prototipo.....	119
Figura 55: Segundo prototipo de cubierta	120
Figura 56: Trazado de la “Y” en el tejido	121
Figura 57: Trazado del perímetro.....	121
Figura 58: Trazado de la base para conformar la red de tela de araña	121
Figura 59: Conformación de la red primaria.....	122
Figura 60: Trazo de la espiral	122
Figura 61: Tercer prototipo de cubierta	122
Figura 62: Fibras de henequén cortadas a 4 mm.....	123
Figura 63: Vaciado del caucho de silicón y agregado del catalizador.....	123
Figura 64: Vaciado de fibras en la mezcla	124
Figura 65: Vaciado de la mezcla en el molde.....	124
Figura 66: Expansión de la mezcla en el molde	124
Figura 67: Conformación del caucho de silicón con la fibra de coco y henequén...124	
Figura 68: Hoja de fibra de coco	125
Figura 69: Desfibración de la hoja	125

Figura 70: Cable de fibra de henequén	126
Figura 71: Hilos de fibra de henequén	126
Figura 72: Configuración de la probeta de fibra de henequén (doble).....	126
Figura 73: Fibras de coco	126
Figura 74: Configuración de la probeta de fibra de coco (doble).....	126
Figura 75: Probeta con tejido de punto	127
Figura 76: Probeta con tejido tipo tafetán.....	127
Figura 77: Prototipo ilustrativo para cubierta 1	136
Figura 78: Prototipo ilustrativo de cubierta 1, vista aérea	136
Figura 79: Prototipo ilustrativo de cubierta 2	137
Figura 80: Prototipo ilustrativo de cubierta 2, vista aérea	137
Figura 81: Prototipo ilustrativo de cubierta 3	137
Figura 82: Prototipo ilustrativo de cubierta 3, vista aérea	137
Figura 83: Tensores en el prototipo de cubierta 2	138
Figura 84: Retícula de caucho de silicón con fibra de henequén y coco	139
Figura 85: Esfuerzo último a tensión de los especímenes de fibra de coco	139
Figura 86: Esfuerzo último a tensión de los especímenes de fibra de henequén ...	140
Figura 87: Gráfico de desplazamiento y esfuerzo aplicado en las probetas	141
Figura 88: Especímenes de fibra de coco después de la prueba	142
Figura 89: Especímenes de fibra de henequén después de la prueba	142
Figura 90: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de punto #1	146
Figura 91: Gráfica de zona elástica para el tejido de punto #1	147
Figura 92: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de punto #2	148
Figura 93: Gráfica de zona elástica para el tejido de punto #2	148

Figura 94: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de tafetán #1.....	149
Figura 95: Gráfica de zona elástica para el tejido de tafetán #1	150
Figura 96: Gráfica de esfuerzo deformación para el tejido de tafetán #2.....	150
Figura 97: Gráfica de zona elástica para el tejido de tafetán #2.....	151
Figura 98: Resistencia a tensión de los materiales sintéticos y tejidos con fibra	152
Figura 99: Gráfica de módulo de elasticidad de fibras sintéticas y tejidos	153
Figura 100: Gráfica de resistencia a tensión acero A-36 y fibra de henequén	153
Figura 101: Gráfica de módulo de elasticidad acero A-36 y fibra de henequén.....	154
Figura 102: Gráfica comparativa de las propiedades mecánicas del henequén	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01: Propiedades ópticas de materiales textiles para su uso estructural.....	28
Tabla 02: Propiedades mecánicas de las fibras textiles	50
Tabla 03: Valores característicos de densidad, diámetro y propiedades	57
Tabla 04: Clases y parámetros de calidad de la fibra de henequén	66
Tabla 05: Propiedades mecánicas de la fibra de henequén	73
Tabla 06: Producción anual de henequén en México durante el 2013	75
Tabla 07: Propiedades mecánicas del acero ASTM A36	99
Tabla 08: Velocidad de extensión	101
Tabla 09: Especificaciones de la máquina de pruebas universales Shimadzu	108
Tabla 10: Longitud y diámetro de los especímenes	130
Tabla 11: Longitud y diámetro para especímenes de fibra de henequén	131
Tabla 12: Medidas de los especímenes tejidos.....	132
Tabla 13: Relación de variables para la realización del experimento	133
Tabla 14: Esfuerzo último de las fibras y cambio de longitud	140
Tabla 15: Resultados de la prueba a tensión de las fibras de henequén	145

REFERENCIAS

- Askeland R. Donald, Fulay P. Pradeep, Wright J, Wendelin. *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F.: Cengage learning, 2011.
- Bahamon, Alejandro. *Arquitectura textil: transformar el espacio*. Barcelona, España: Instituto morisa de ediciones, S.A.
- Basset Salom, Luisa. «Universidad politécnica de Valencia.» *Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras*. <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16499/Tensoestructuras.pdf?sequence=3> (último acceso: 25 de Febrero de 2014).
- Becerra Lomonaco, Tessore. *Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura*. 2011. http://www.fceia.unr.edu.ar/darquitectonico/darquitectonico/data/pdf/fceia.monografia.frei_otto_2.pdf (último acceso: Marzo de 2014).
- Berger, Horst. *Light structures*. Berlín: Birkhauser Verlag, 1996.
- Bures profesional, S.A. <http://www.grn.es/sicosa/tecnic/fibradecoco.htm> (último acceso: 10 de Febrero de 2014).
- CANNABRIC. 2014. http://www.cannabric.com/media/documentos/564f4_CANNABRIC_ficha_tecnica_y_ensayos.pdf (último acceso: 17 de Marzo de 2014).
- CANNABRIC. *CANNABRIC*. Diciembre de 2008. http://www.cannabric.com/media/documentos/564f4_CANNABRIC_ficha_tecnica_y_ensayos.pdf (último acceso: 17 de Marzo de 2014).
- Cannabric. *Ficha técnica de materiales*. http://www.cannabric.com/media/documentos/570c4_TECHNIFEUTRE_ficha_tecnica.pdf (último acceso: 19 de Marzo de 2014).
- Carrillo Lara, Luis Felipe. «Modificación de las propiedades interfaciales en materiales compuestos polietileno de alta densidad-fibra de henequén.» Universidad Politecnica de Valencia, España, Enero de 1998.
- Cazaurang-Martinez M.N., Herrera-Franco P.J., Gonzalez-Chi P.I., Aguilar-Vega M. «Physical and mechanical properties of henequén fibers.» Centro de investigación científica de Yucatán, 1990.

- Ceola, Maria Teresa, et al. *Espazio, revista nacional e independiente sobre arquitectura textil*. 2013. <http://www.editorialespazio.com/es/proyectos/detalle/16> (último acceso: 26 de Marzo de 2014).
- Cobreros Rodriguez, Carlos. «Uso de fibras vegetales procedentes de explotaciones agrícolas en la edificación sostenible.» Vols. <http://mastersuniversitaris.upc.edu/aem/archivos/2008-09-tesinas-pres/18-carlos-cobrerros-rodriguez-uso-de-fibras-vegetales-en-la-edificacion-sostenible.pdf>. Barcelona, España.
- Conde Polanco, Pablo. *Escuela técnica superior de ingenieros industriales*. 12 de Abril de 2005. <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/kevlar/macromoleculas.htm> (último acceso: 22 de Febrero de 2014).
- Conde Rito, Sayra. «Estudio de la fibra de coco con resina poliéster para la manufactura de palas de aerogeneradores de pequeña potencia.» Oaxaca: Universidad del Istmo , 2010.
- De Llorens Duran, Jose Ignacio. *Los detalles constructivos de las tensoestructuras*. 2011. http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/15512/1/PONENCIA_LLORENS.pdf (último acceso: 03 de Marzo de 2014).
- Elices Calafat, Manuel. *Real academia de ciencias*. <http://www.rac.es/ficheros/doc/00339.pdf> (último acceso: 24 de Marzo de 2014).
- Fabio, Tomczak. «Estudios sobre a estrutura e propiedades de fibras de coco e curauá do Brasil.» *Tesis de doctorado en ingeniería y ciencia de los materiales*. Brasil: Universidad Federal de Paraná, 2010.
- FAO. 2009, *Año internacional de las fibras naturales*. 2009. <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/> (último acceso: 26 de Octubre de 2014).
- Godoy, Emilio. *Inter press service: agencia de noticias*. 12 de Agosto de 2013. <http://www.ipsnoticias.net/2013/08/la-ignorada-faceta-productiva-del-cannabis/> (último acceso: 28 de Octubre de 2014).
- Gómez Jauregui, Valentin. «Estructuras tensegríticas: Ingeniería y arquitectura novedosas.» (Servicio publicaciones CEDEX), nº 152 (2008).
- Gonzalez Murillo, Ansell. «Mechanical properties of henequen fibre/epoxy resin composites.» *Mechanics of composite materials, Vol. 45, No. 4*. 2009.

- Grover, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*. México, D.F.: Prentice Hall, 1997.
- Harris, James. *masted structures in architecture*. Londres: Butterworth architecture, 1996.
- Hernández René, Vicente. «Uso de fibras de bagazo de caña en concreto. Tratamiento de las fibras con parafina.» Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana, 2008.
- Hernandez, Arleni. *Prezi*. 16 de Marzo de 2014. <http://prezi.com/zhlcvb0k44oi/tensionadas/> (último acceso: 20 de Marzo de 2014).
- Hoyos Mora, Juan Manuel. *Las estructuras tensegrity*. Colombia: Colección punto aparte, 2009.
- Jaramillo Jimenez, Jose Oscar. *Análisis Clásico de estructuras*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- Juarez Alvarado, Cesar Antonio. «Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (agave lecheguilla) como materiales para construcción en México.» Universidad Autónoma de Nuevo León, Junio de 2002.
- Kulkarni, A.G., Satyanarayana K.G., Sukumaran K., Rohatgi, P.K. «Mechanical behavior of coir fibres under tensile load.» *Journal of materials science*, 16.
- *La Jornada*. 06 de Febrero de 2014. <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/02/06/bagazo-de-cana-posible-componente-de-concreto-hidraulico-4963.html> (último acceso: 13 de Marzo de 2014).
- Le Ricolais, Robert. «Estructuras neumaticas.» 2011.
- Llorens, Josep. «Atlas de detalles de la construcción textil.» Barcelona, España: Escuela de arquitectura de Barcelona, 2012.
- Marroquín, Alberto. «Revista digital apuntes de arquitectura.» 32 (2011).
- Neufert, Ernst. *El arte de proyectar en arquitectura*. Madrid, España: Gustavo Gili, 1995.
- Niponica. «Niponica, revista digital.» n° 11 (2013).
- Onrubia, Javier. *TECMOVIA, Tecnología y coches de nueva generación*. 08 de Octubre de 2011. <http://www.tecmovia.com/2011/10/08/ford-apuesta-por->

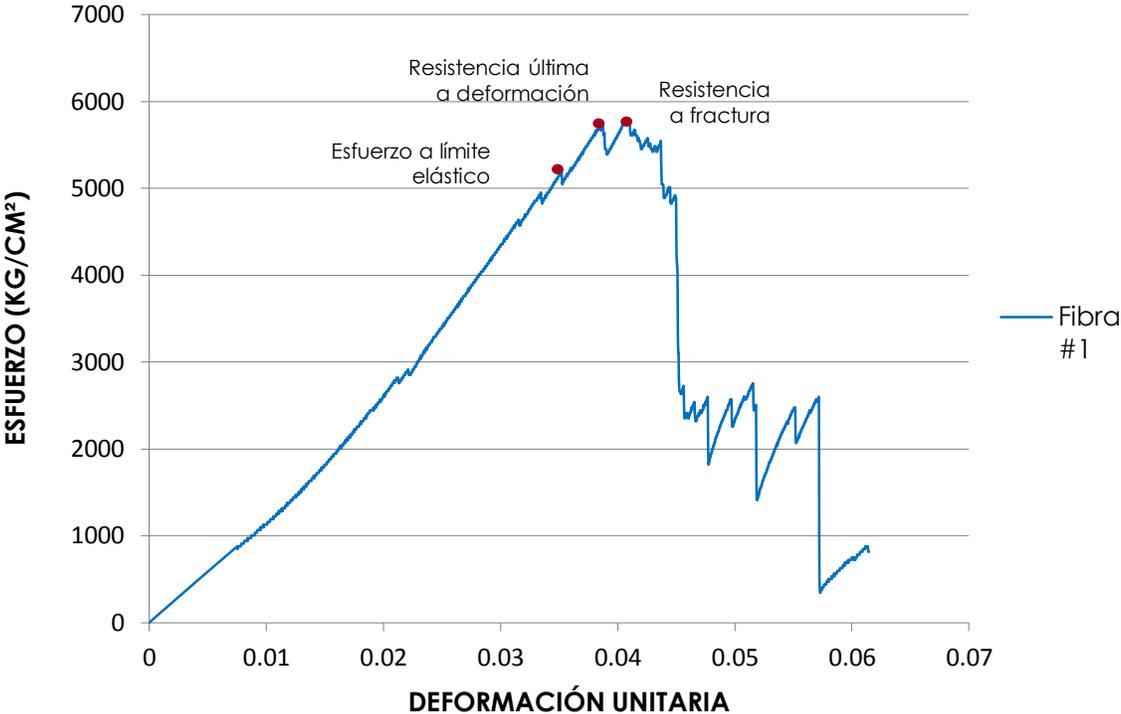
el-coco-para-construir-materiales-en-sus-coches/ (último acceso: 20 de Marzo de 2014).

- Rodríguez Galvez, Helena. *Mimbrea: sostenibilidad, eficiencia y ecoconstrucción para tu vivienda*. 2014. <http://www.mimbrea.com/guia-practica/aislanientos-naturales-i-productos-industriales-de-canamo> (último acceso: 17 de Marzo de 2014).
- Rojas, Sebastián. *Wiki*. 21 de Enero de 2012. http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Caso_Estudio_Estadio_Olimpico_de_Munich/_Frei_Otto_-_Proyecto_Stuttgart_21_-_Sagrada_Familia_/A.Gaudi (último acceso: 26 de Marzo de 2014).
- Rosas, Javier. *ABC*. es. 09 de Agosto de 2013. <http://www.abc.es/sociedad/20130809/abci-material-construccion-coco-arroz-201308081819.html> (último acceso: 12 de Marzo de 2014).
- SAGARPA. *Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación*. 2014. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> (último acceso: 26 de Octubre de 2014).
- Salvador M.D., Amigo V., Nuez A., Sahuquillo O., Llorens R., Martí F. «Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas.» Instituto de tecnología en materiales, Universidad politécnica de Valencia, España.
- Sampieri-Bulbarela, Manzano-Ramirez A., Reyes-Araiza J.L., Muñiz Villareal M.S., Gasca Tirado J.R., Apátiga L.M., Savastano H., Marroquín de Jesús A. «Influences of a novel henequen fabric structure on the mechanical properties of a polymeric composite.» *Scientific research and essays* Vol. 6, 2011.
- Sanchez Sierra, Javier. «Generación, manipulación y visualización de estructuras tensadas en tiempo real.» *Tesis de doctorado, publicada*. San Sebastián, 2006.
- Txema, Albert. *Tipis*. 1 de octubre de 2006. <http://www.inoxidables.net/nacionesindias/creditos.htm> (último acceso: 22 de 02 de 2014).
- Valcárcel Pérez, Juan. *E.T.S. Arquitectura de A. Coruña, departamento de tecnología en la construcción*. <http://departamentos.etsa.udc.es/webdtcon/wp-content/uploads/2009/10/5-estructuras-textiles.pdf> (último acceso: 13 de Marzo de 2014).
- Vandenberg, Maritz. *Cable nets*. Italia: Academy editions, 1998.

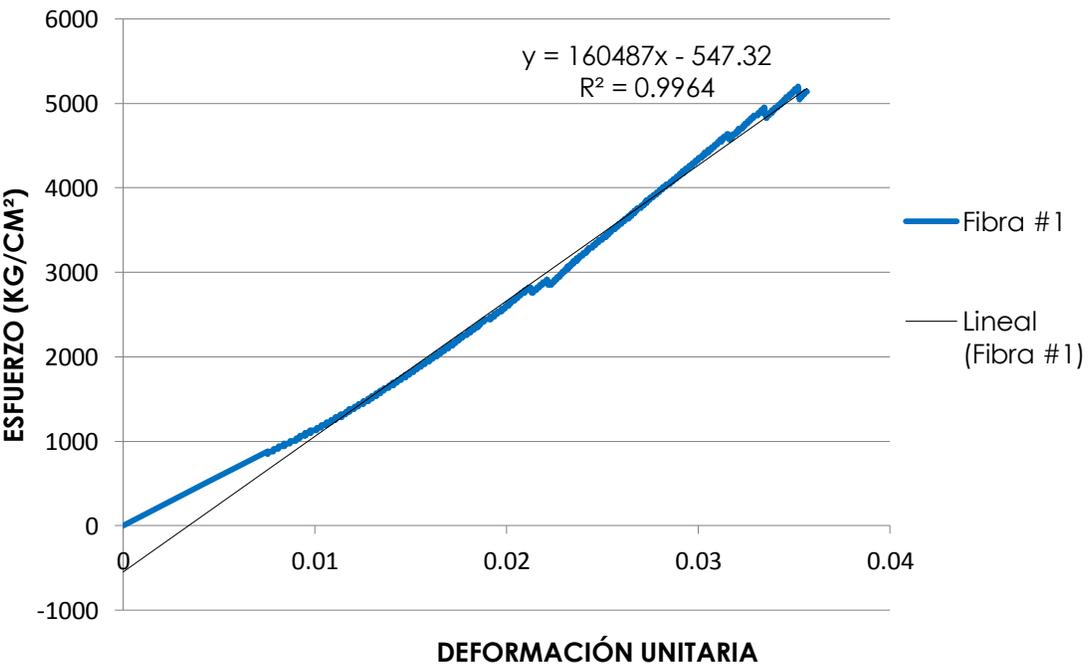
- Vega-Baudrit, José. «Materiales polimericos compuestos a partir de residuos generados por la agroindustria de la caña de azúcar.» (Revista iberoamericana de polimeros) 9, n° 4 (2008).
- Velazquez, Rosa. *IZARO: ManUFACTURING TECHNOLOGY*. 09 de Enero de 2014. (último acceso: 26 de Marzo de 2014).

ANEXOS

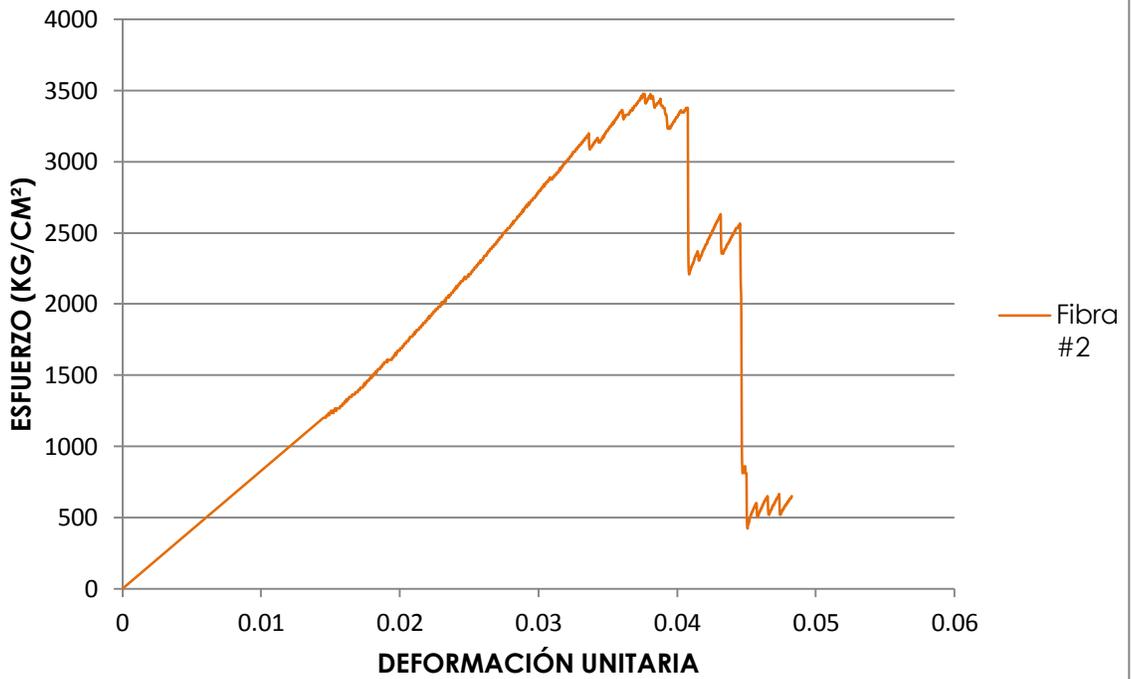
GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #1



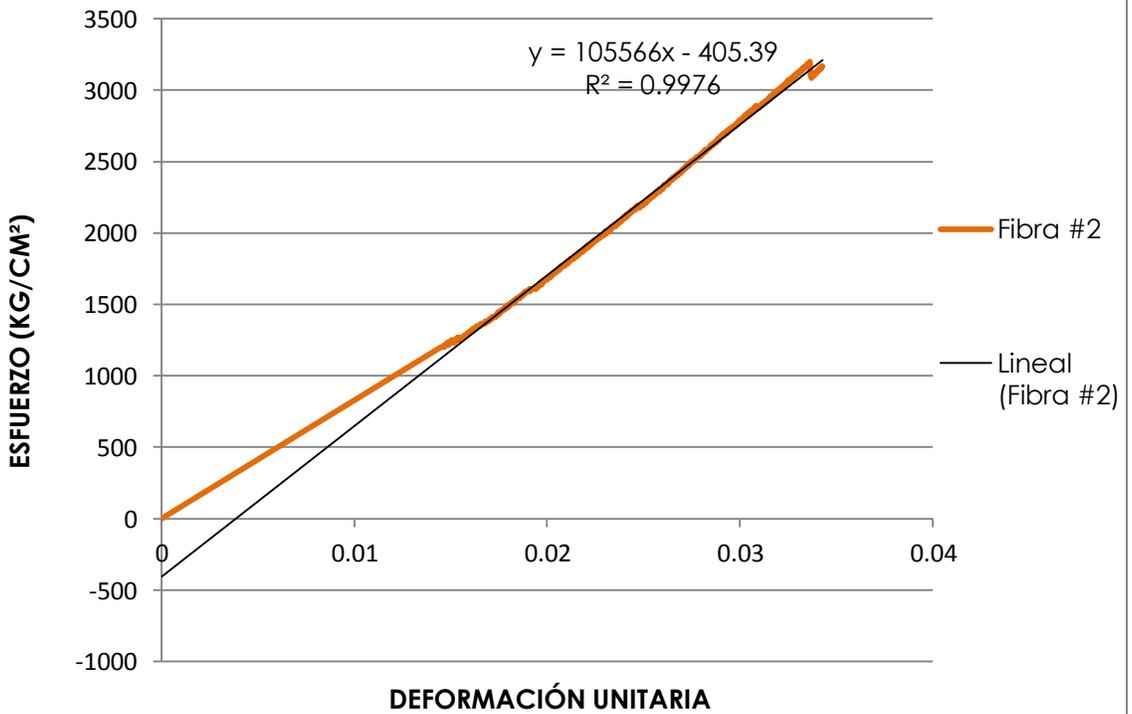
ZONA ELASTICA FIBRA #1

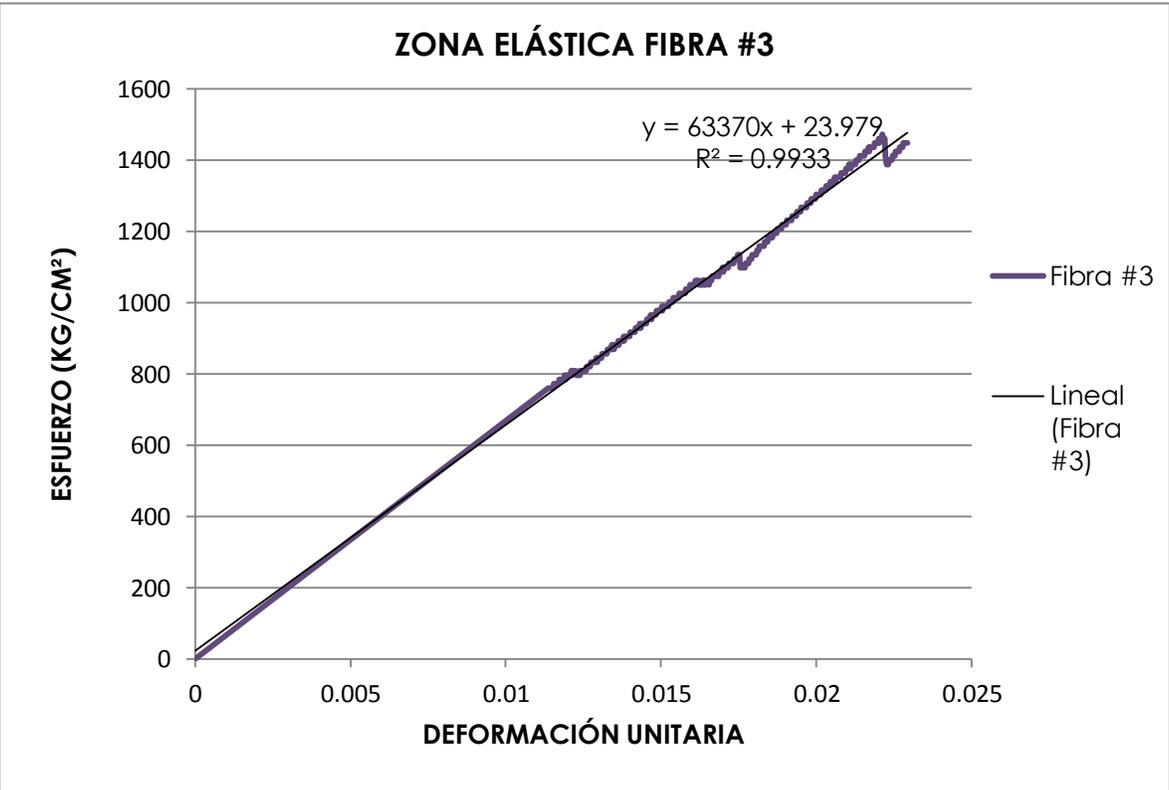
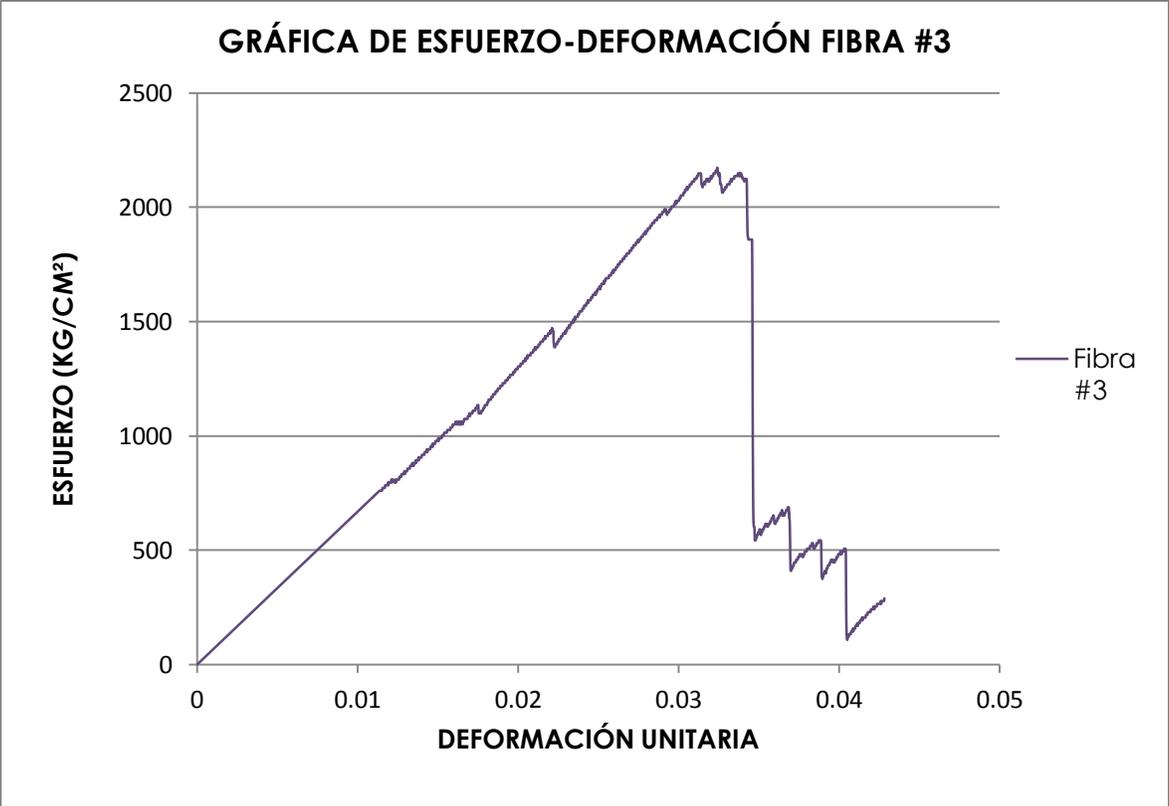


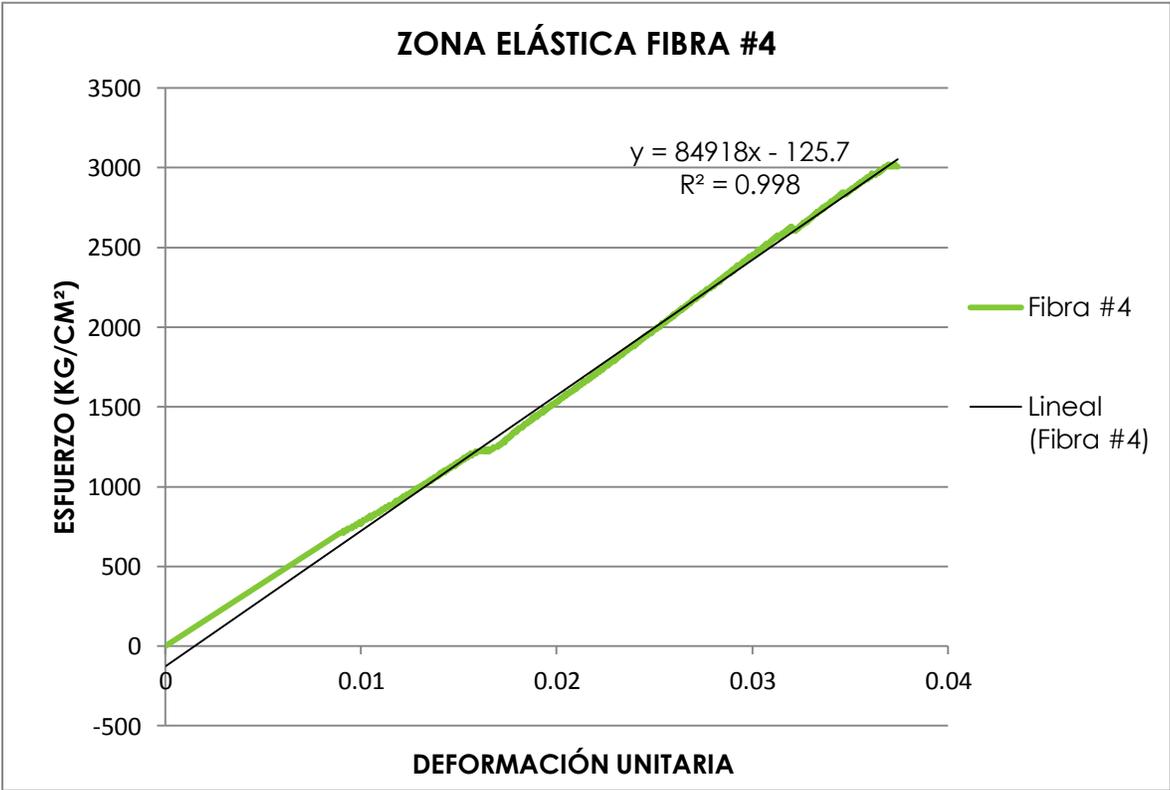
GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #2



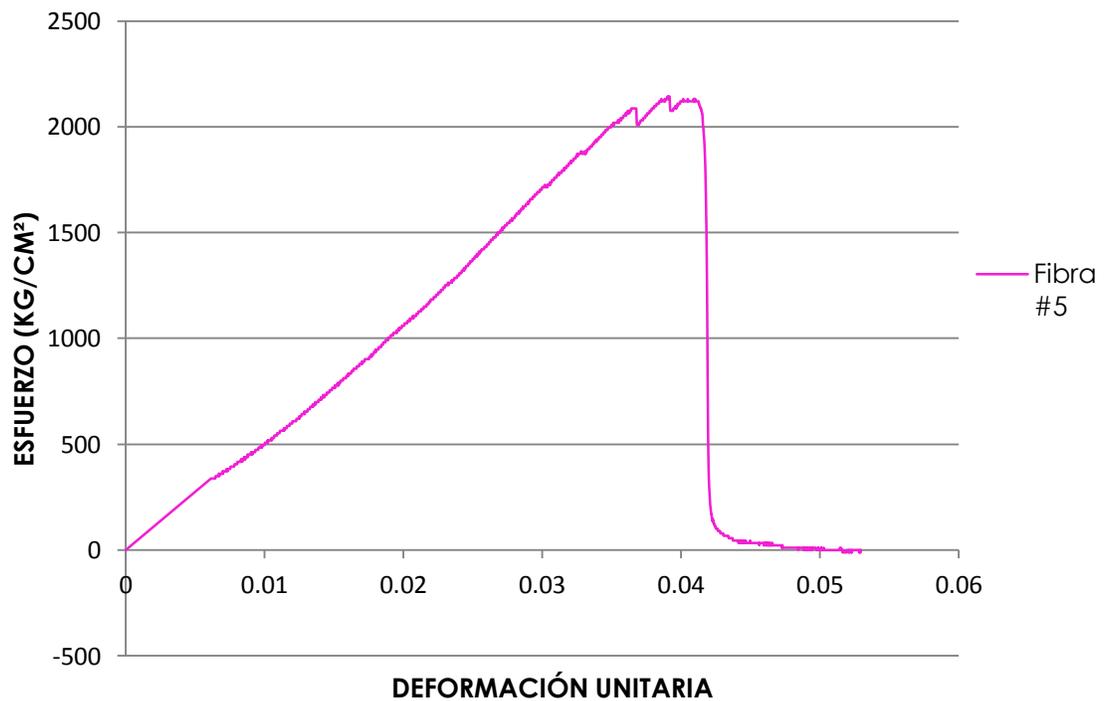
ZONA ELÁSTICA FIBRA #2



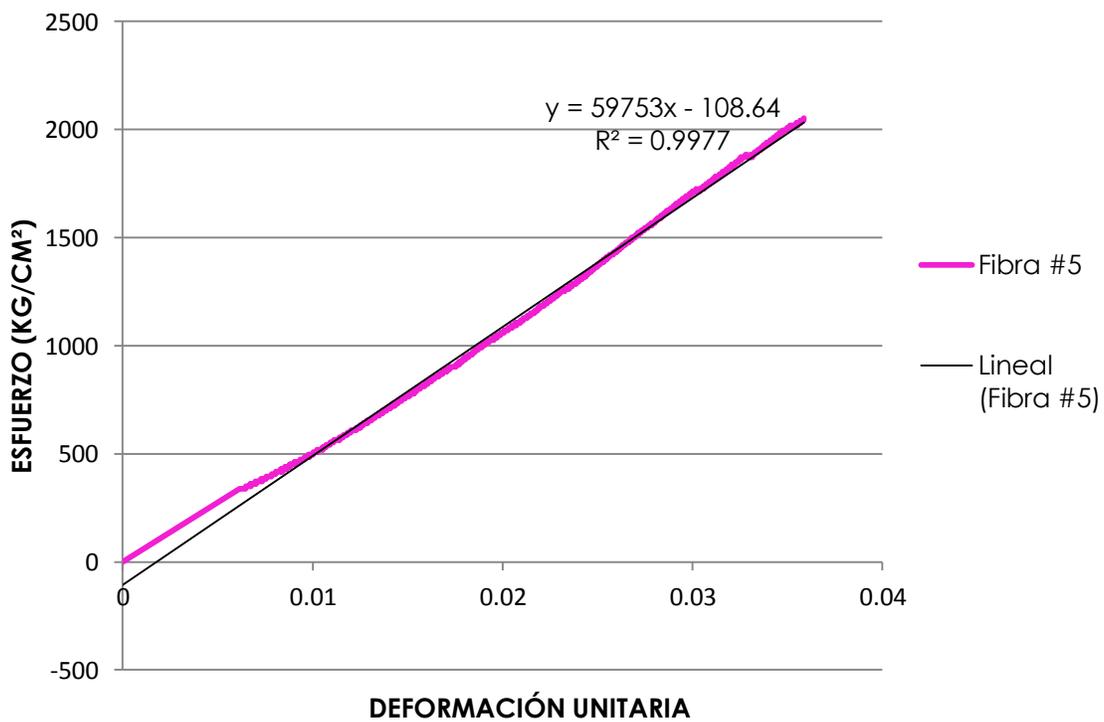




GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #5



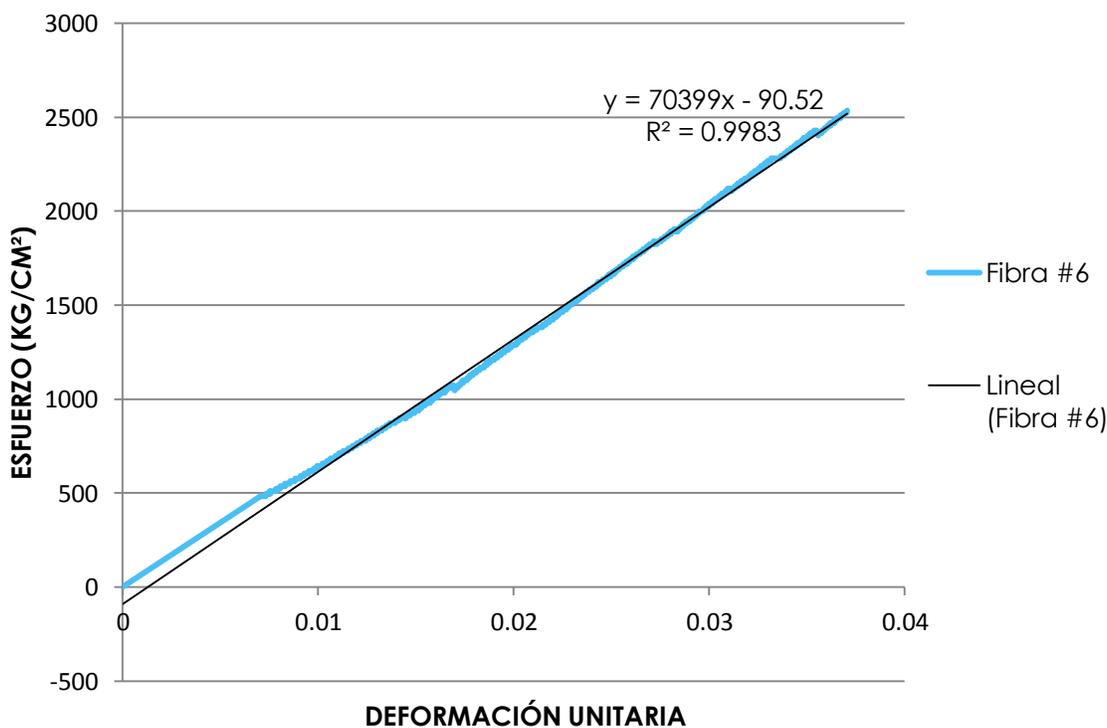
ZONA ELÁSTICA FIBRA #5



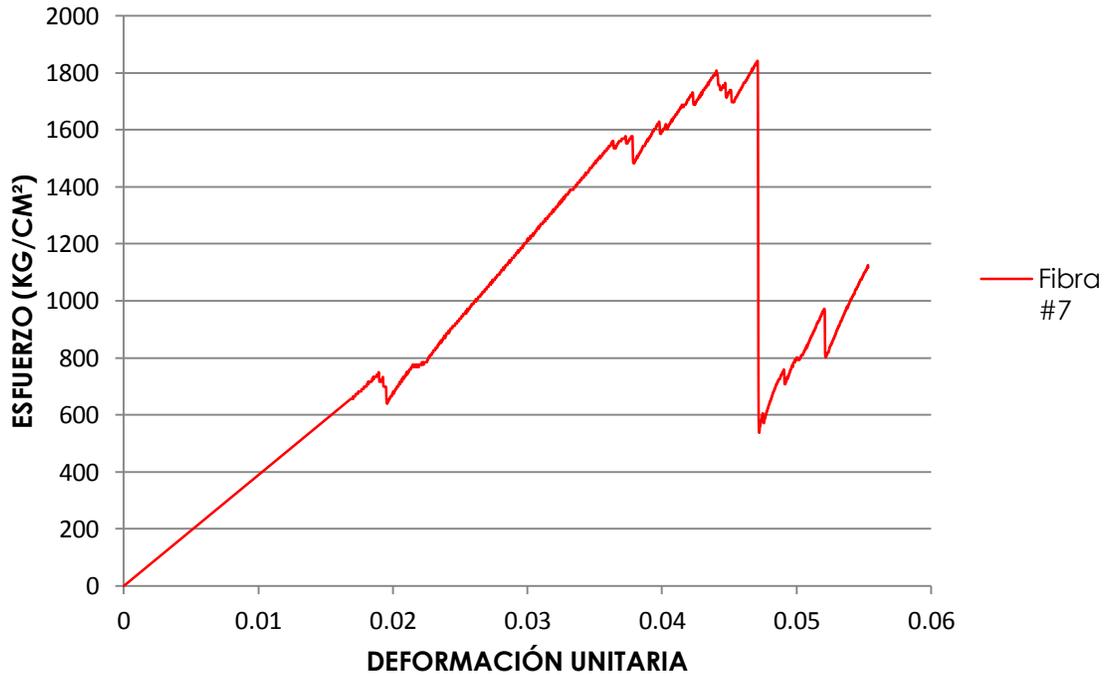
GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #6



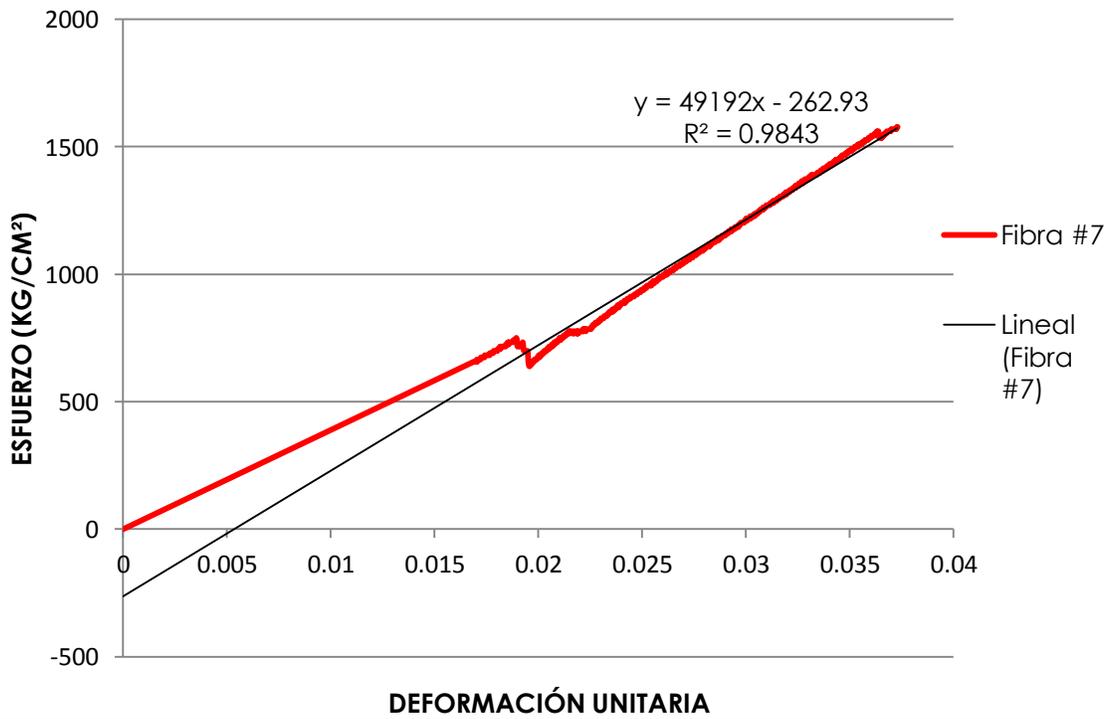
ZONA ELÁSTICA FIBRA #6



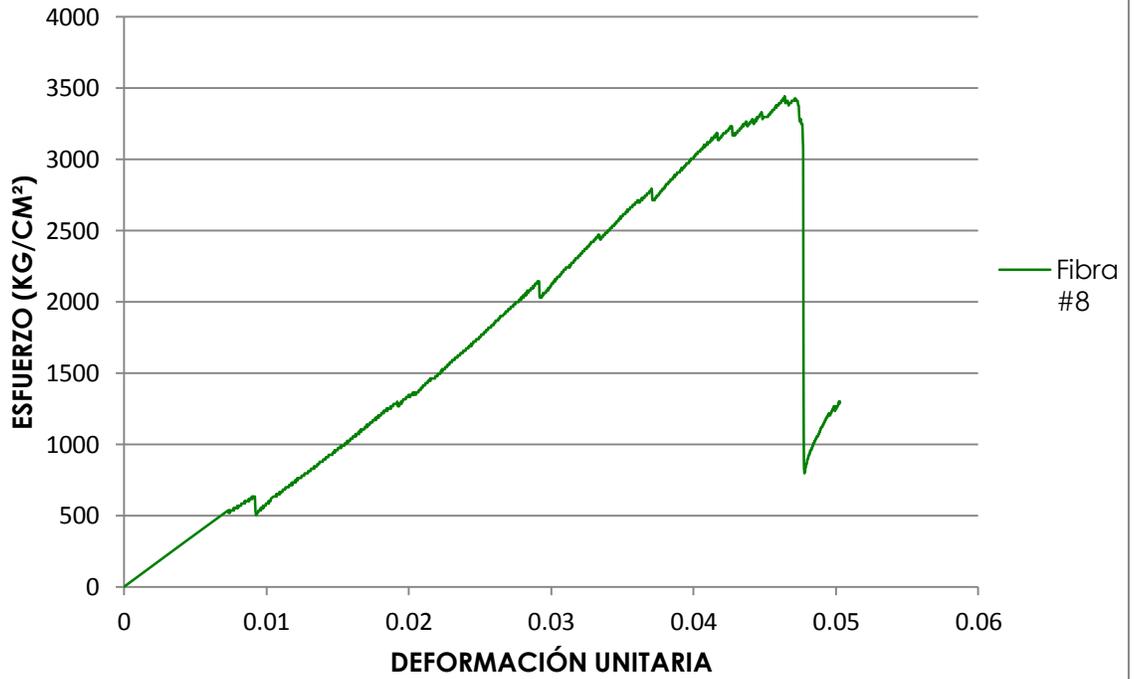
GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #7



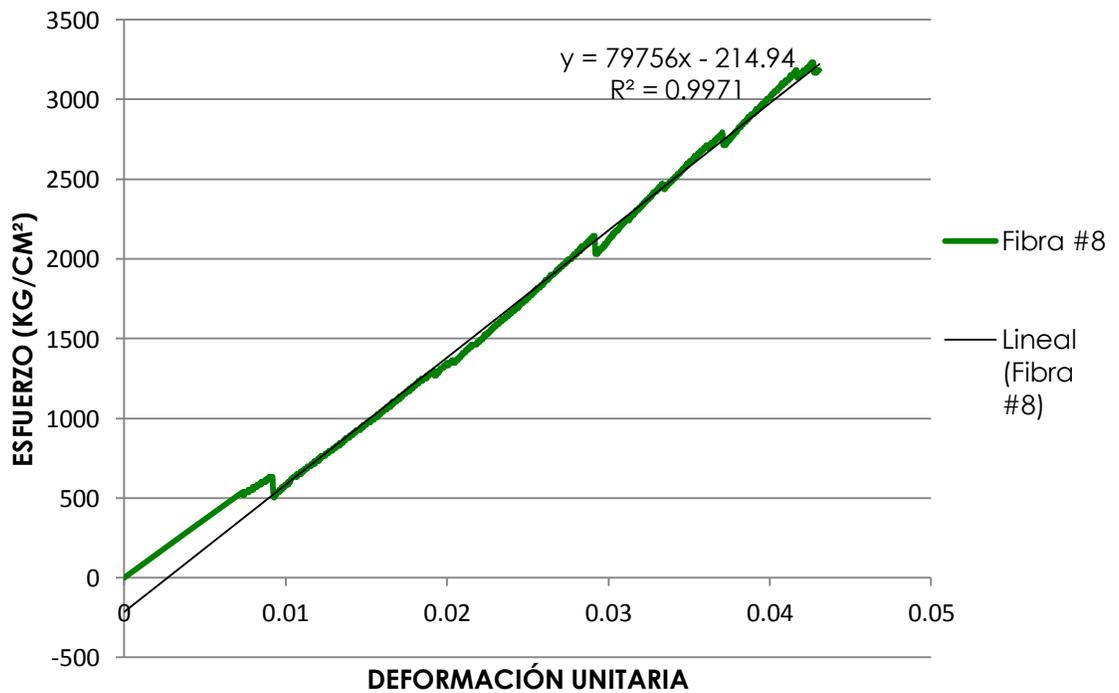
ZONA ELÁSTICA FIBRA #7

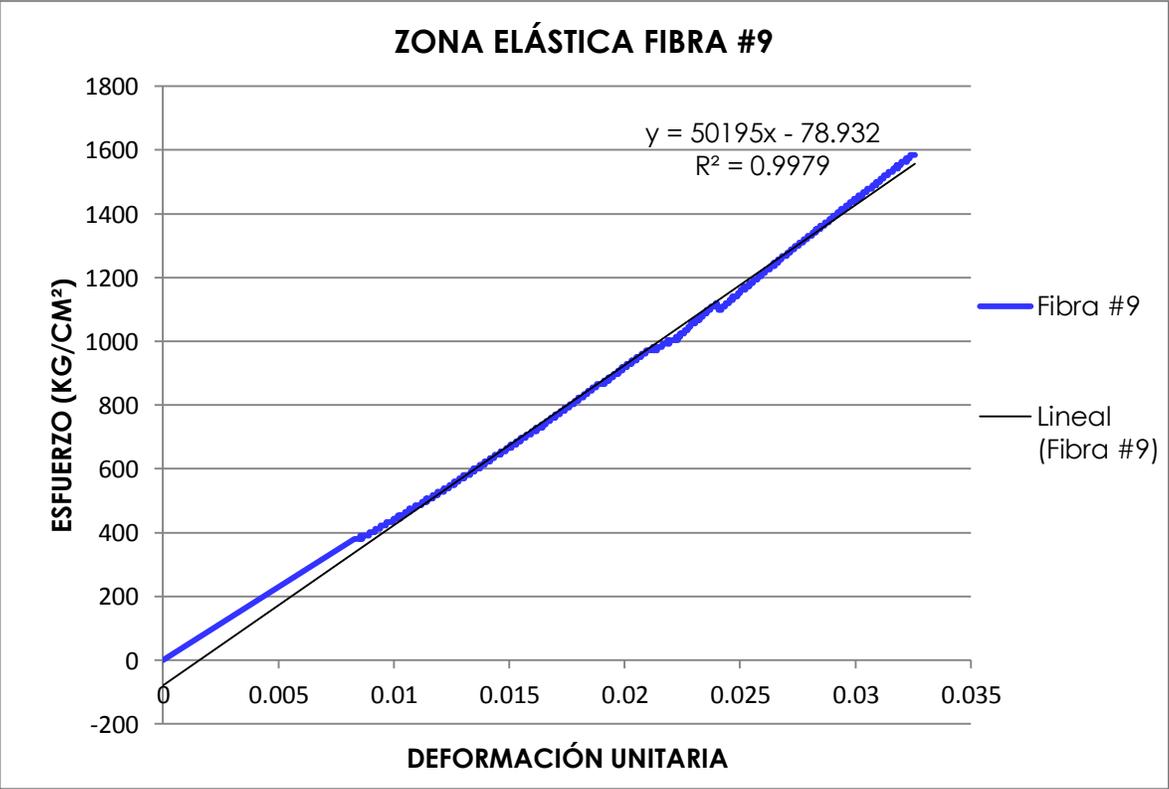


GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #8



ZONA ELÁSTICA FIBRA #8

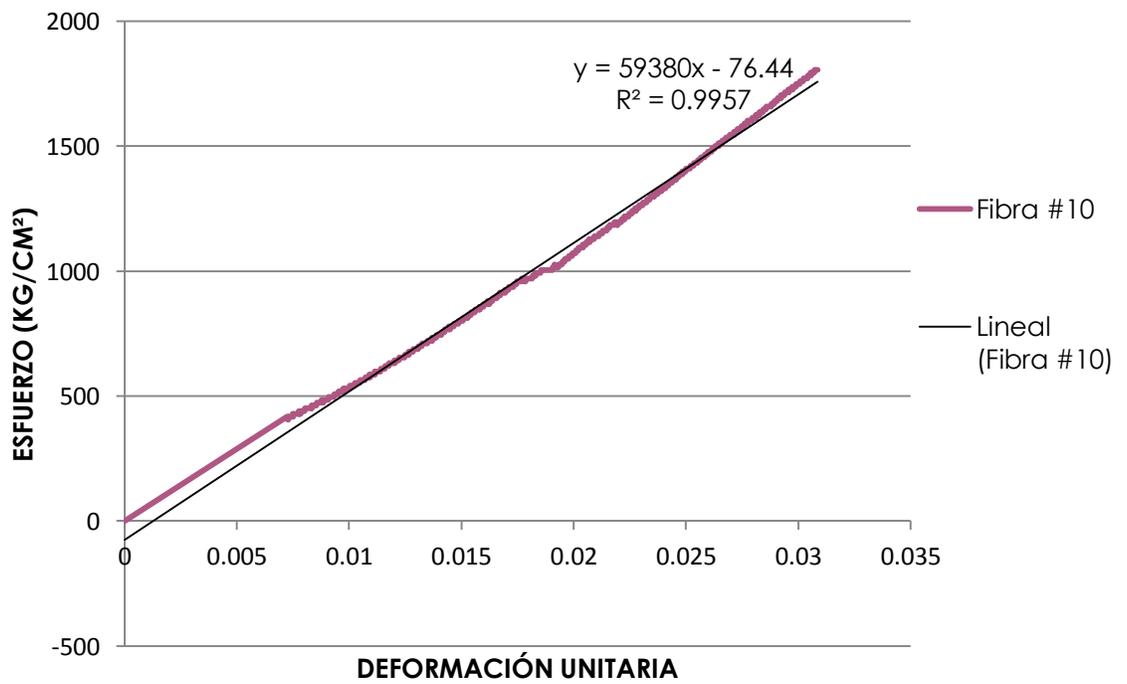


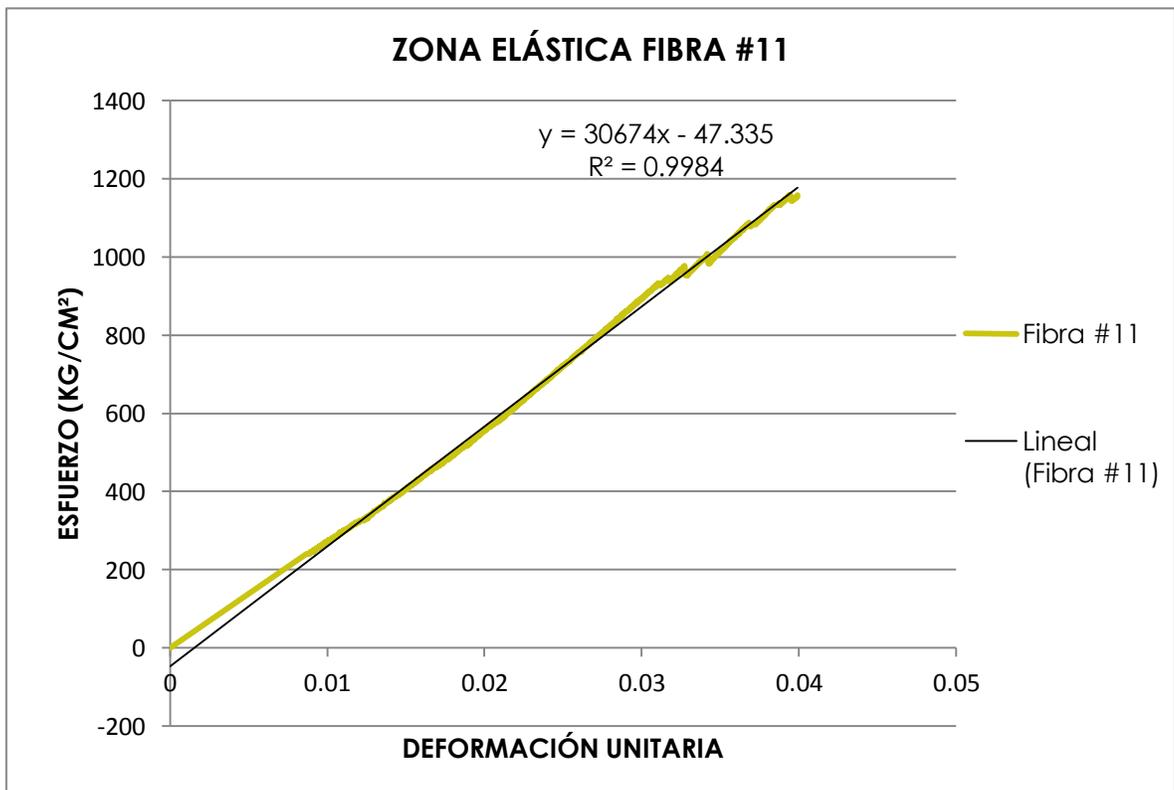
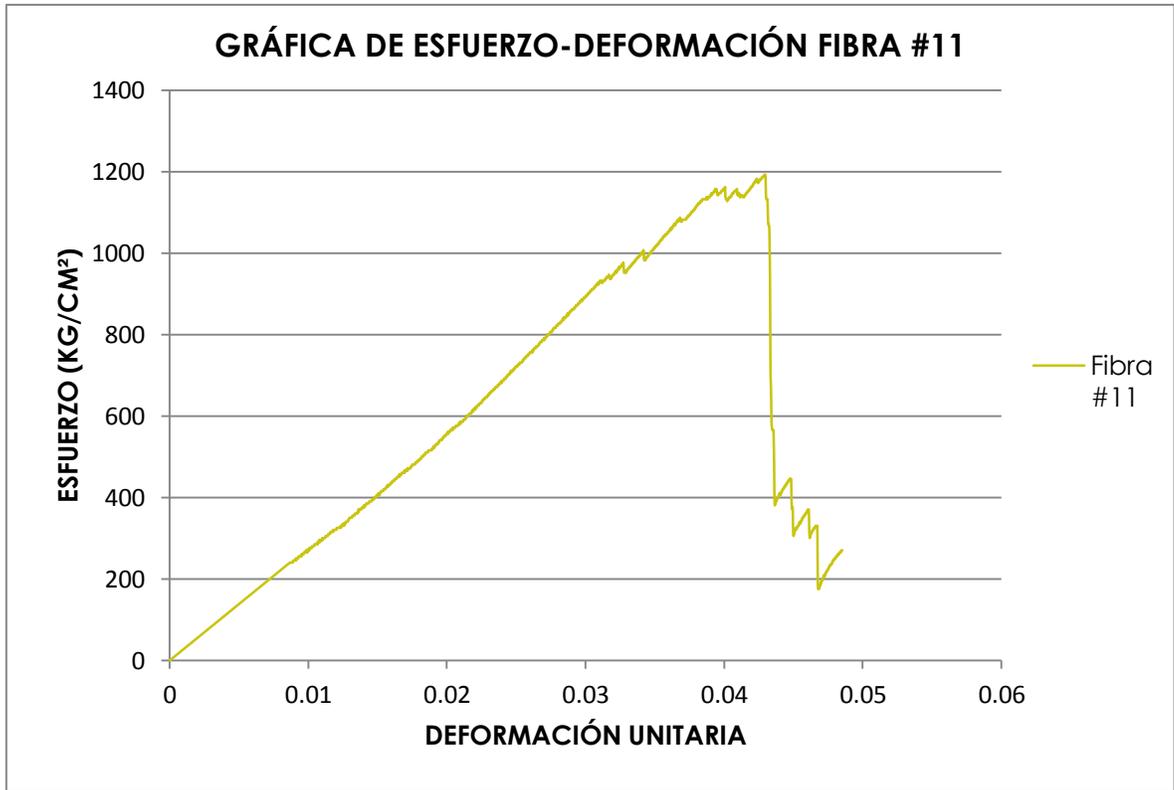


GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #10

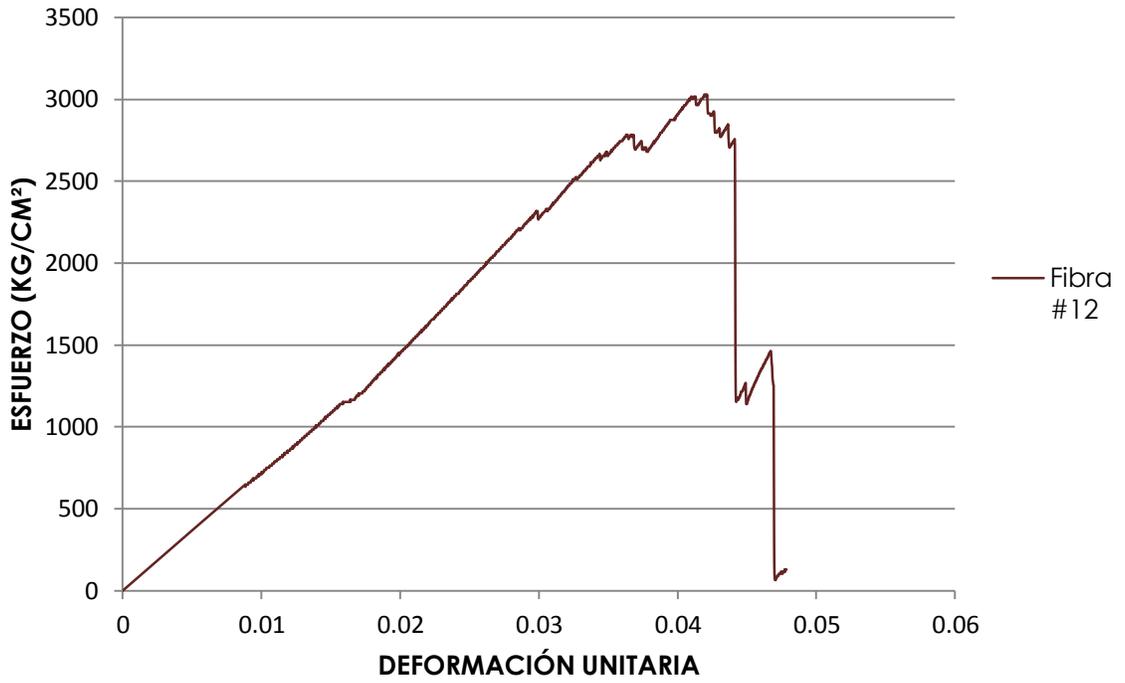


ZONA ELÁSTICA FIBRA #10

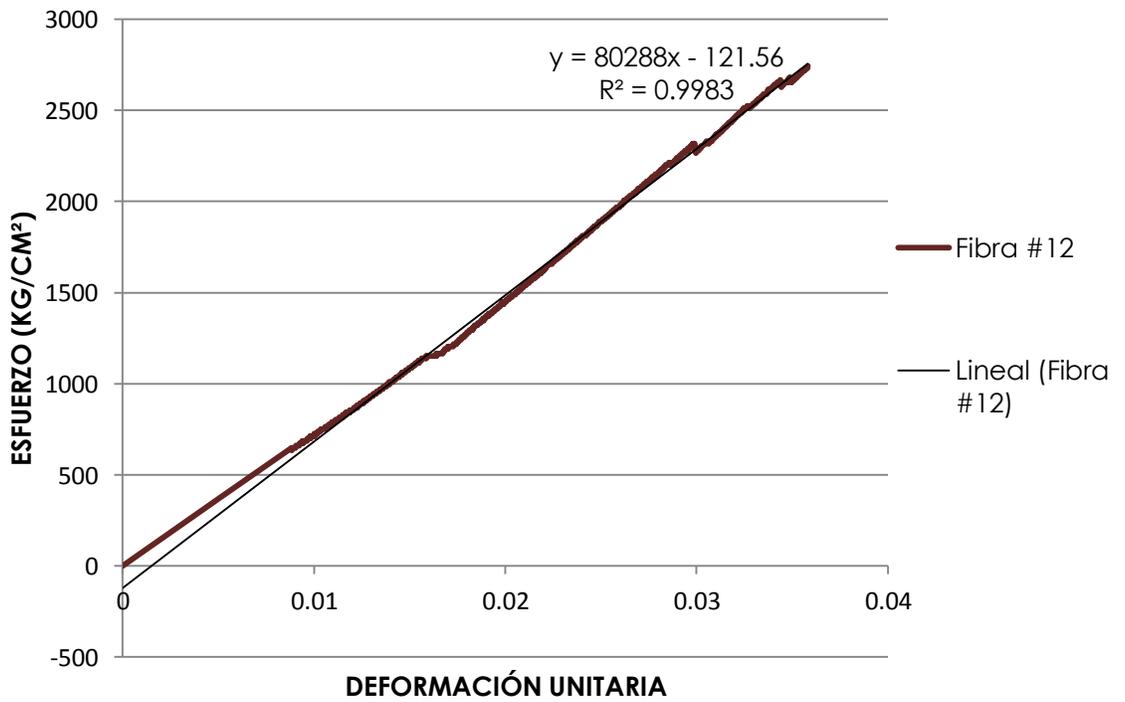




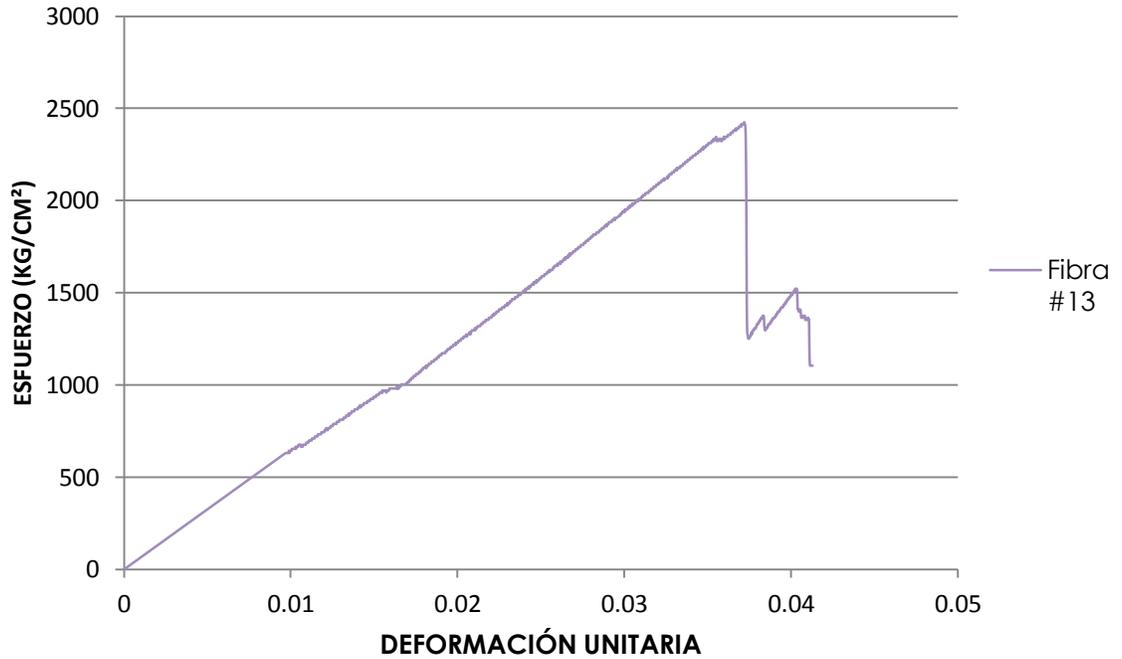
GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #12



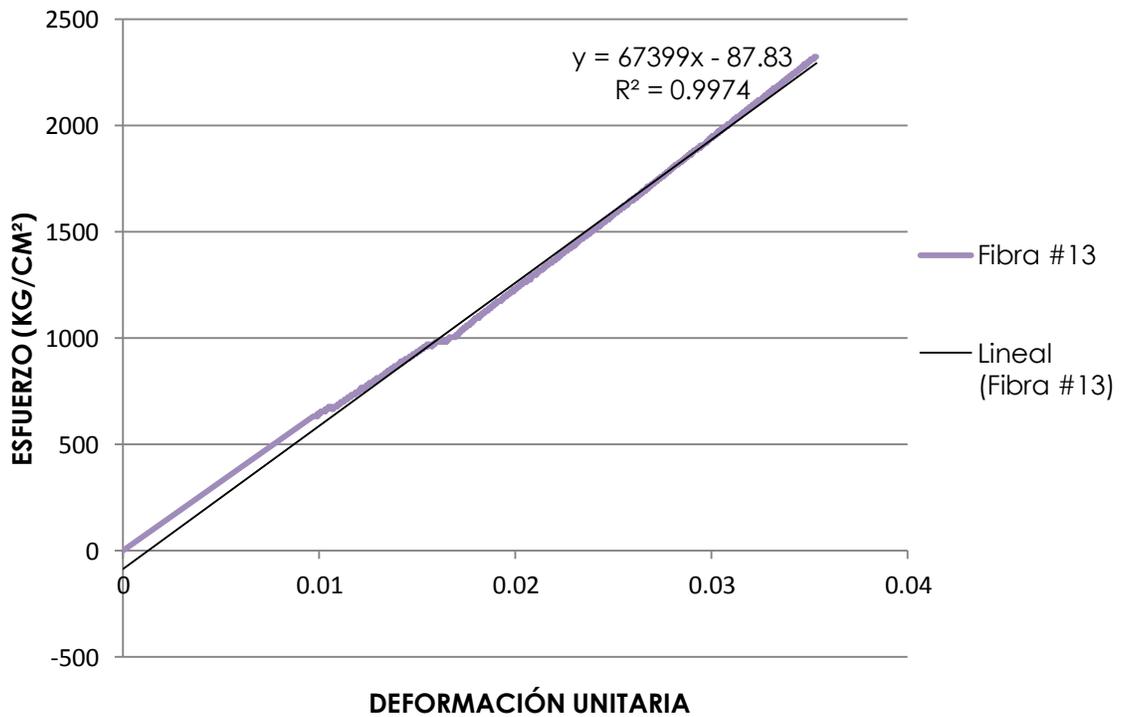
ZONA ELÁSTICA FIBRA #12



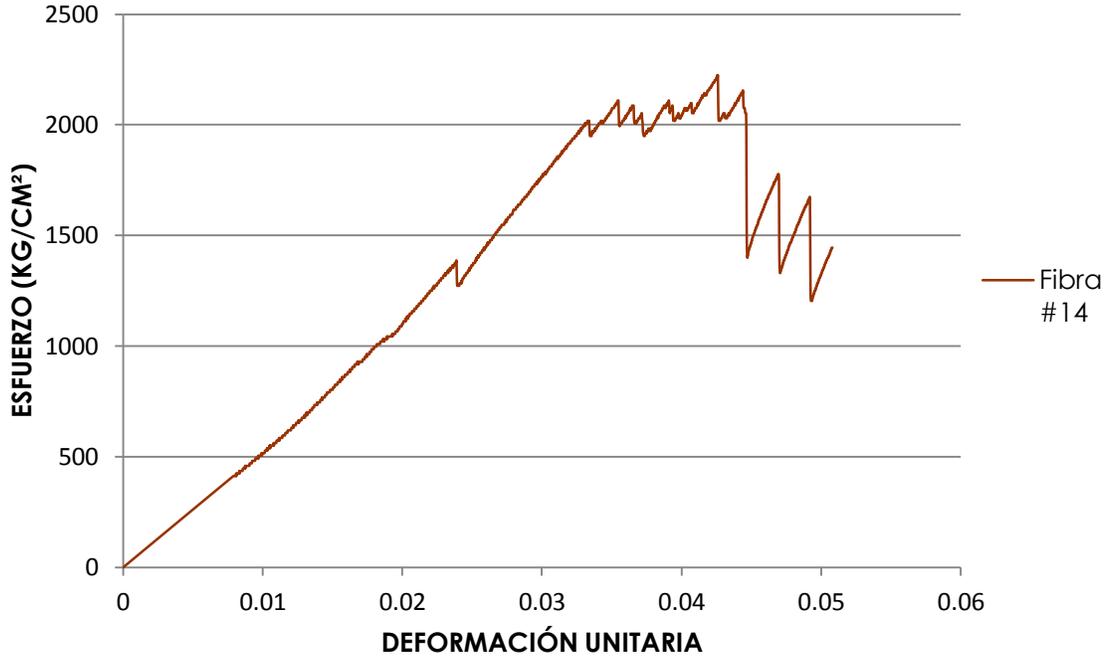
GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #13



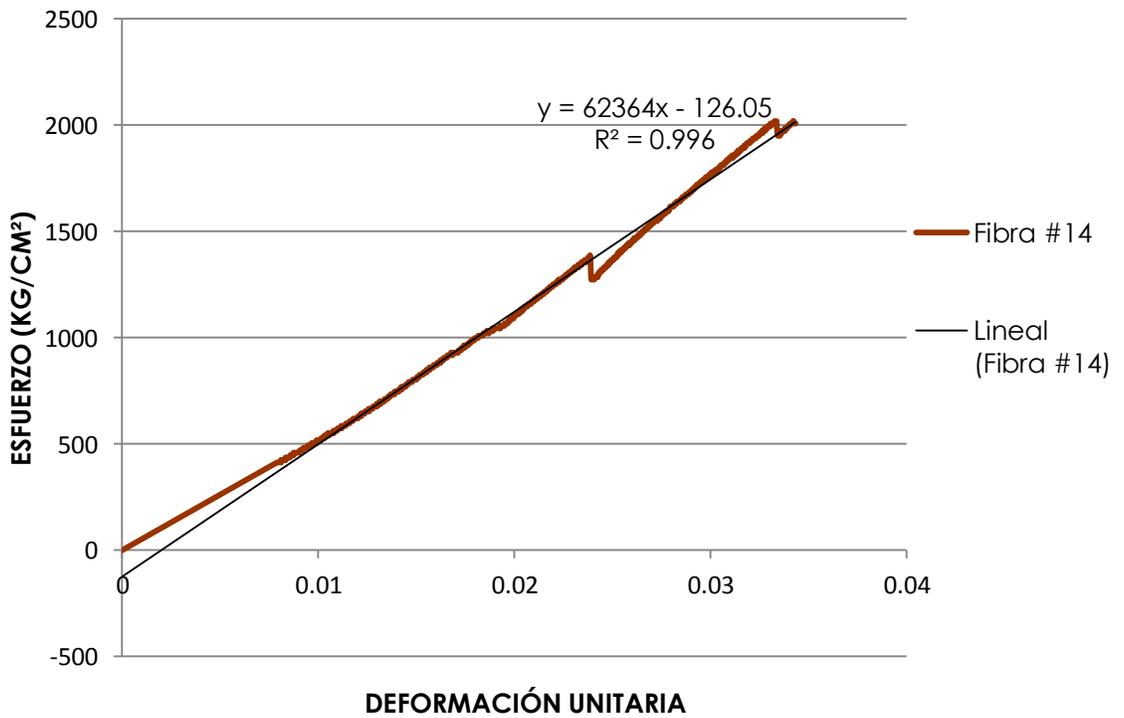
ZONA ELÁSTICA FIBRA #13

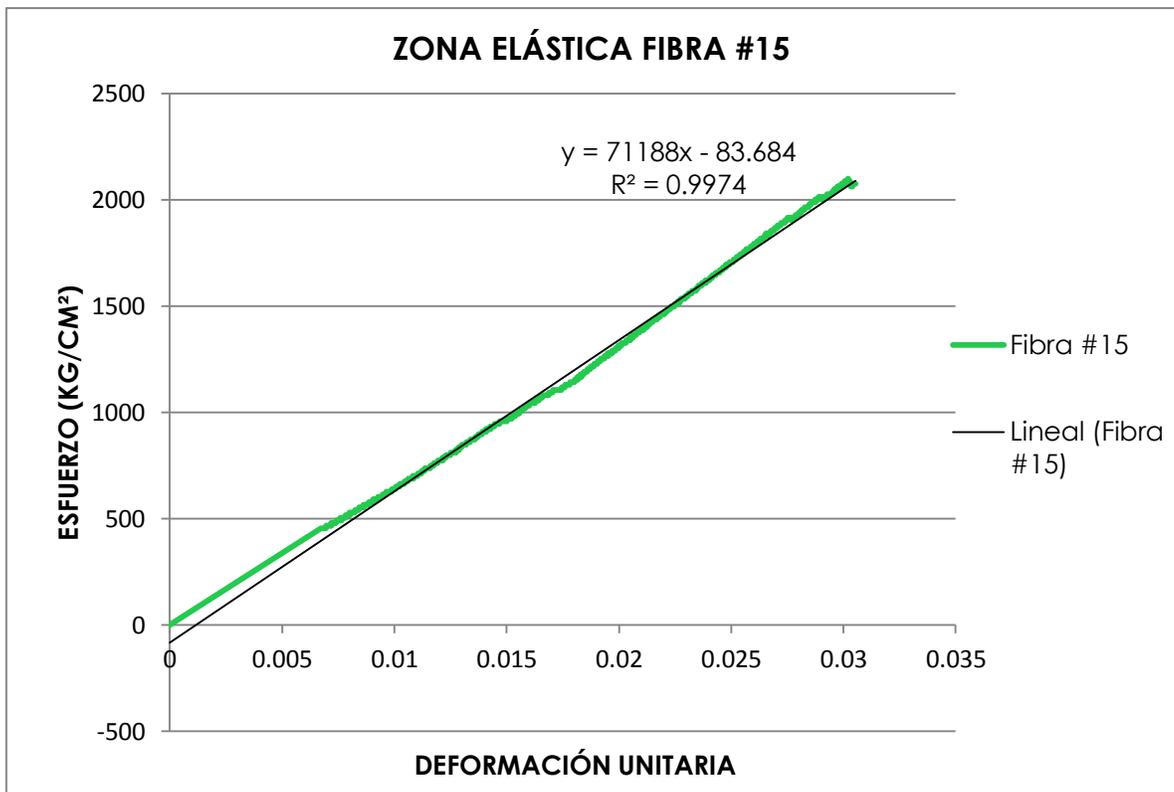


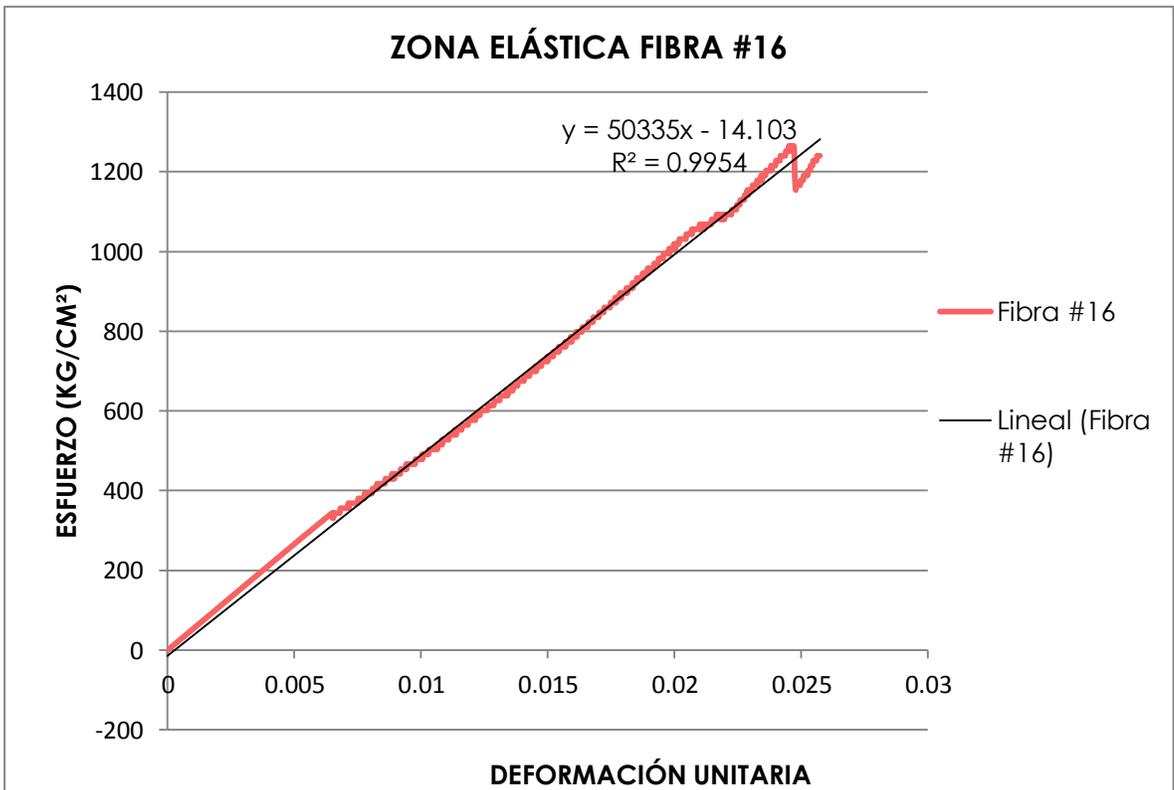
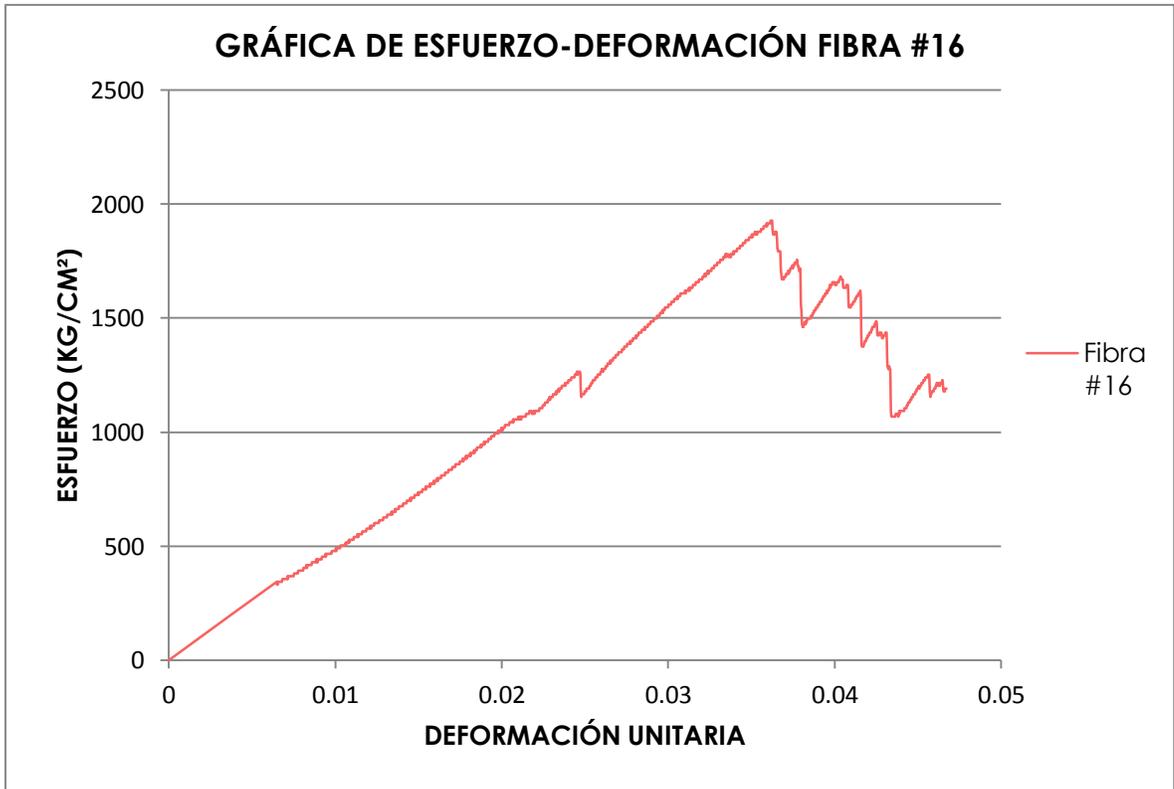
GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #14

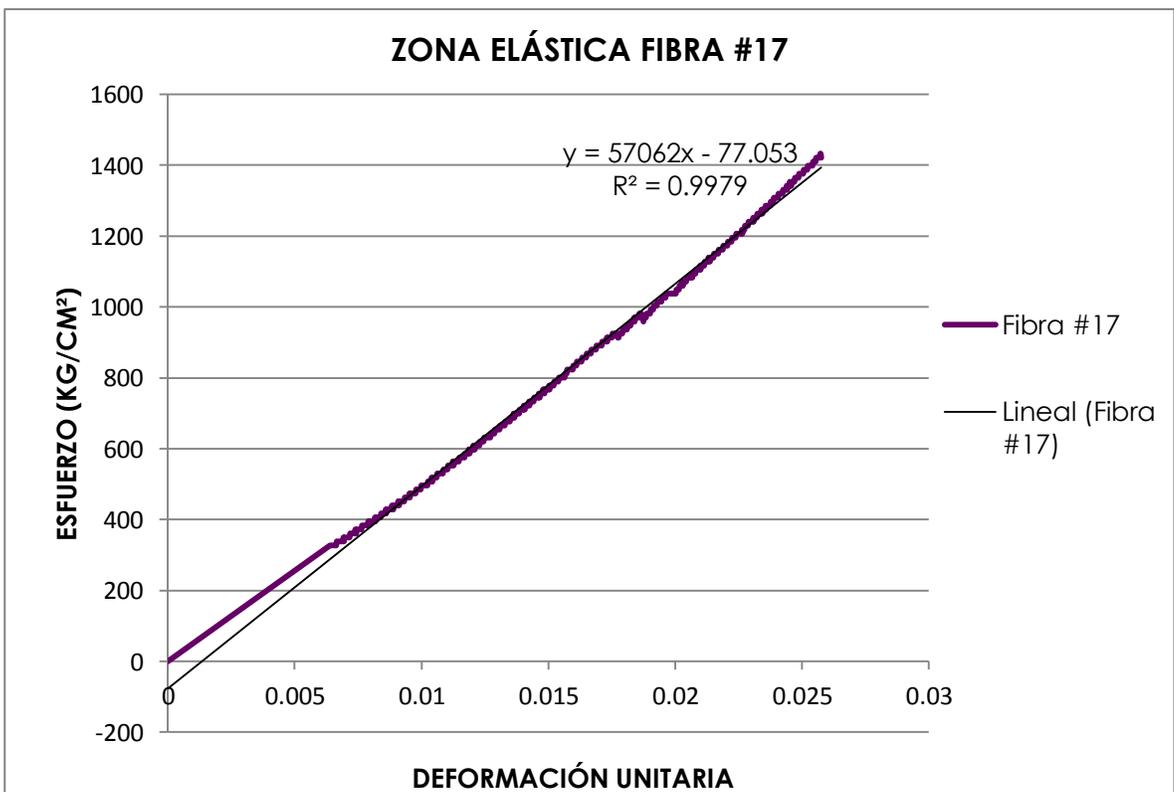
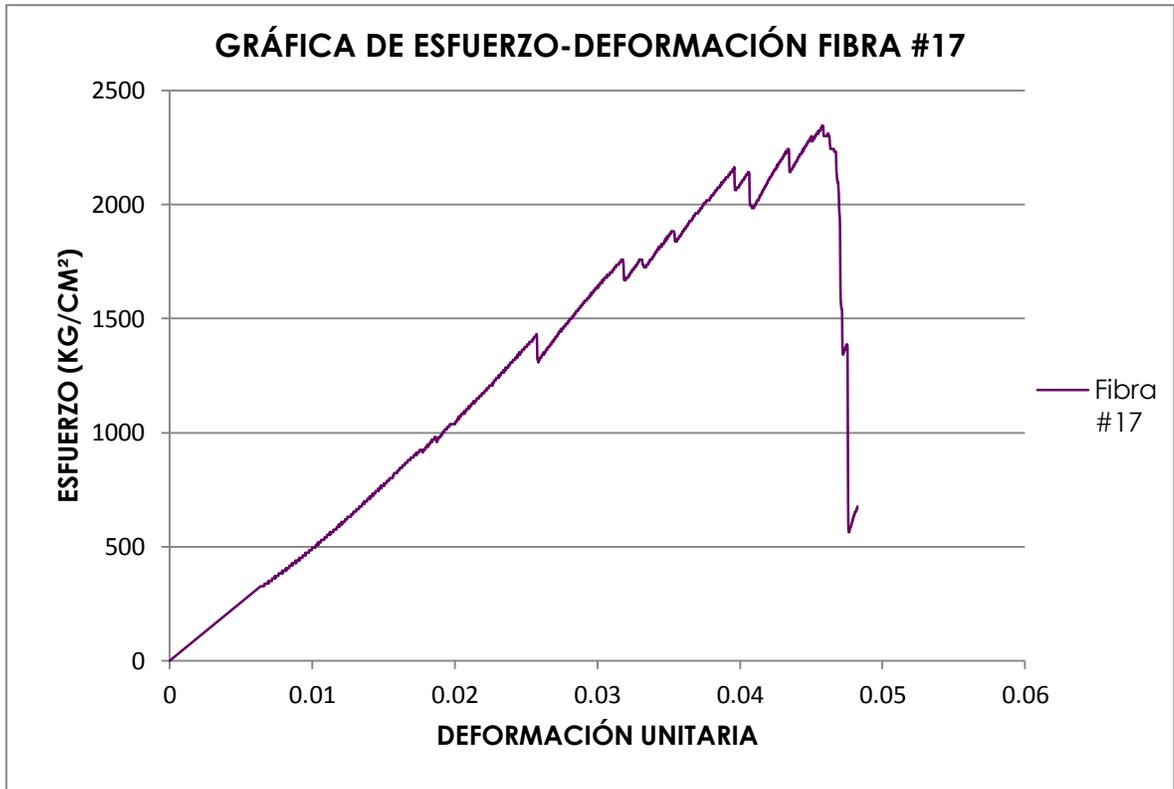


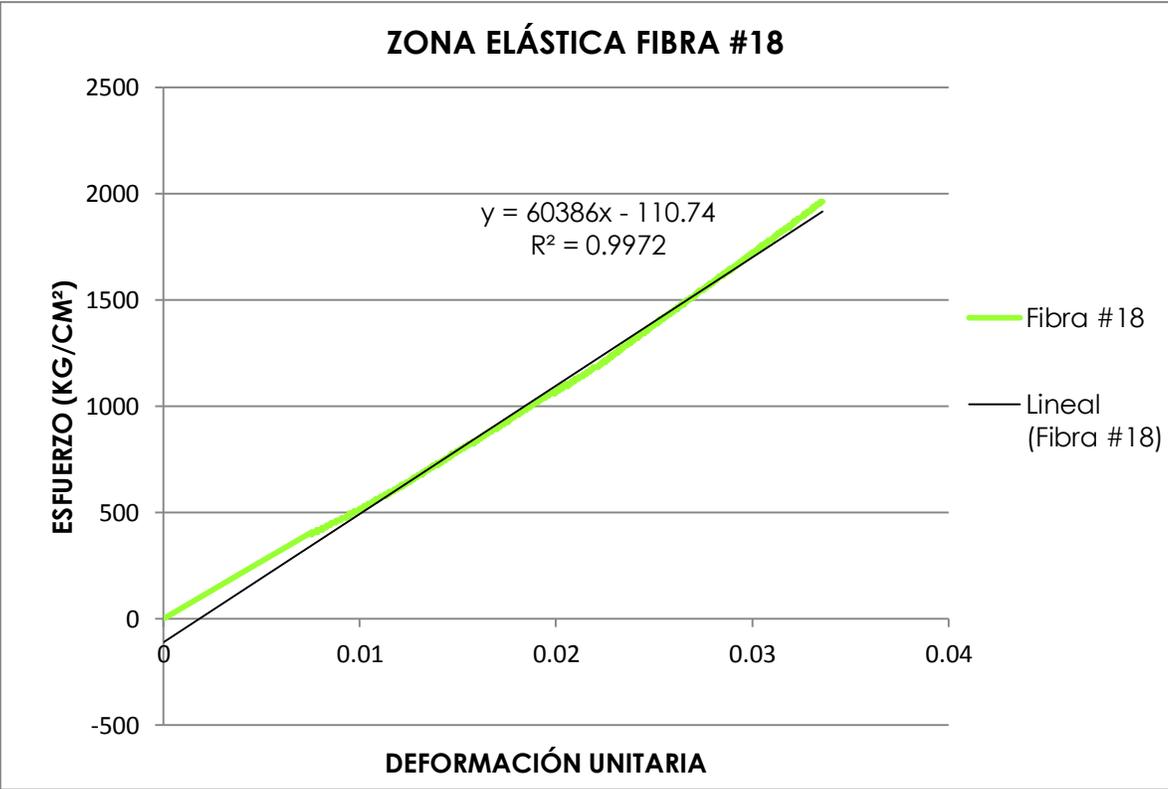
ZONA ELÁSTICA FIBRA #14

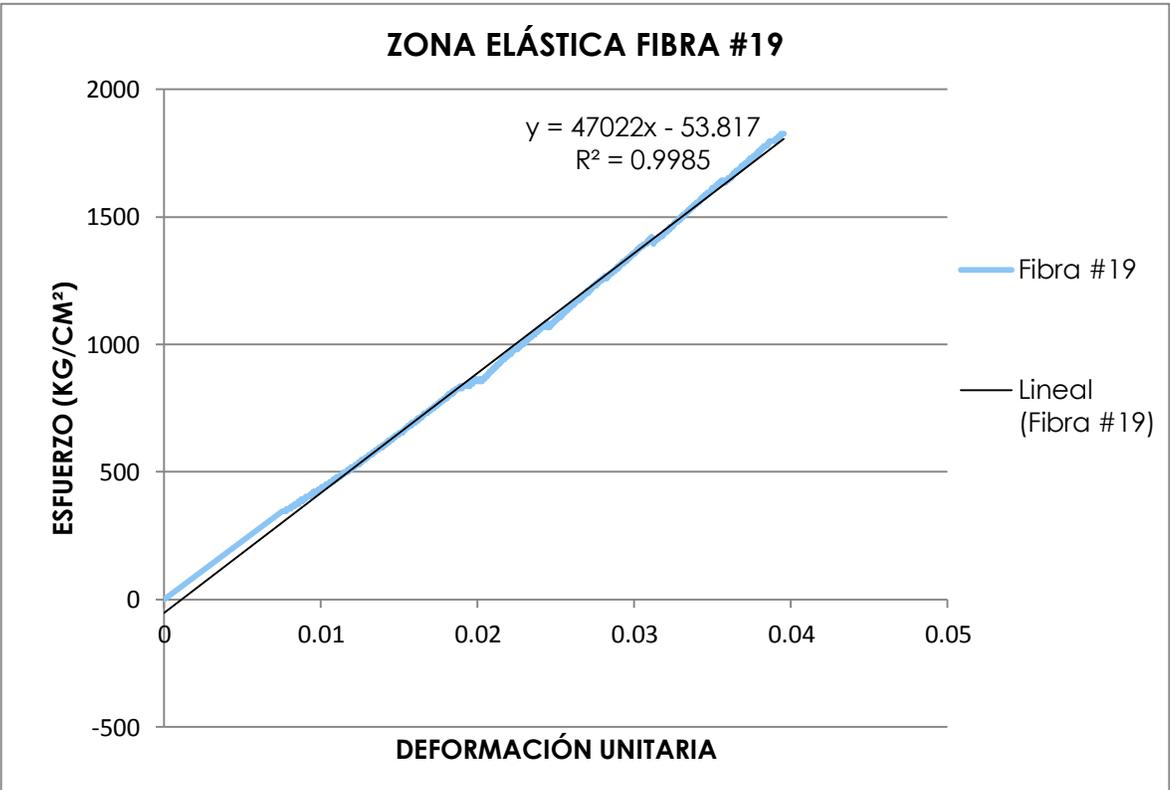
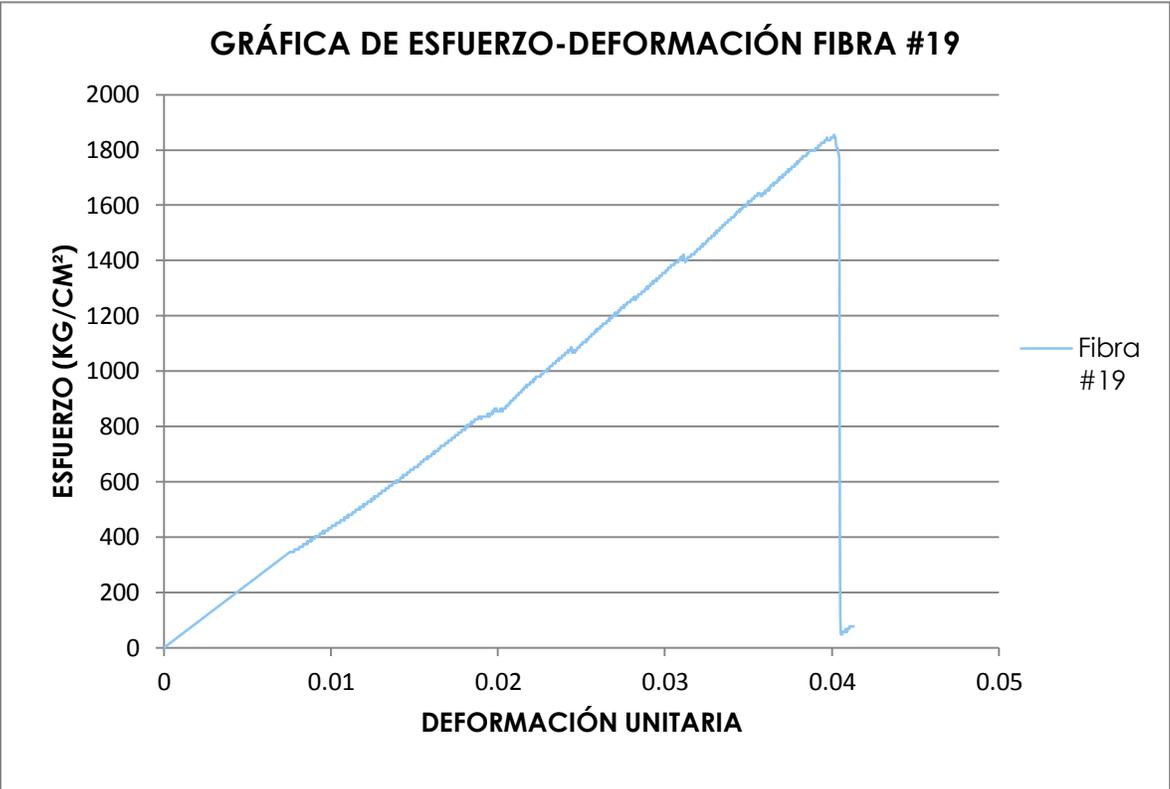




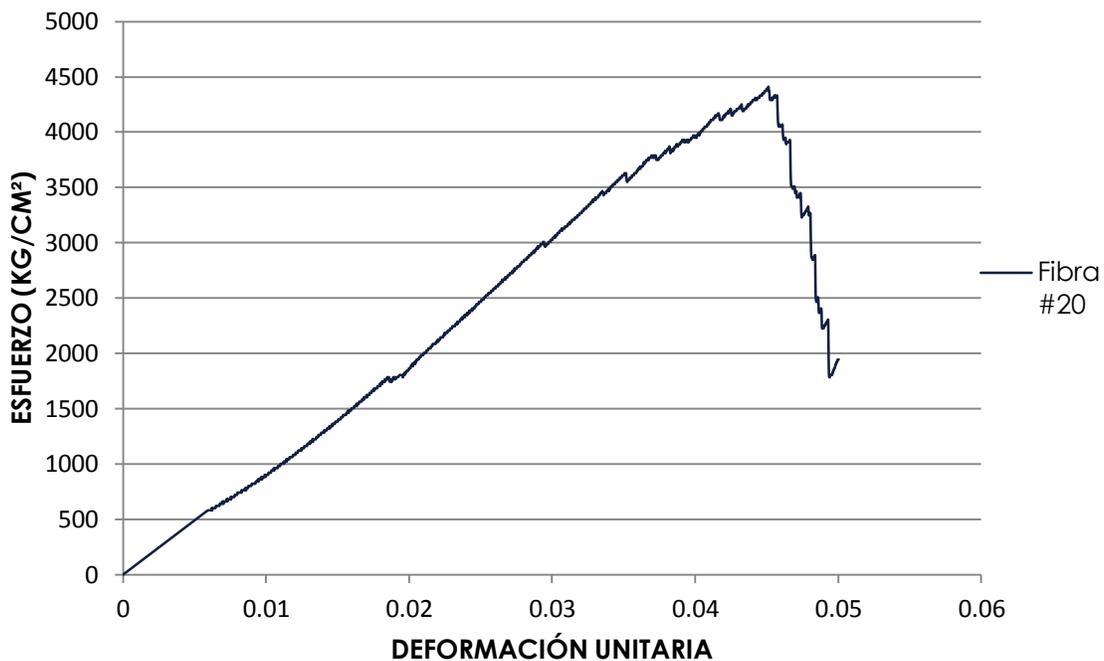








GRÁFICA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN FIBRA #20



ZONA ELÁSTICA FIBRA #20

