



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA
EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento
de Recursos Naturales (Ingeniería de procesos)

**“PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN DE LAS FIBRAS DEL BAGAZO DEL
Agave angustifolia Haw, RESIDUO PROVENIENTE DE LA PRODUCCIÓN
ARTESANAL DEL MEZCAL”**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

Presenta:

Carlos Inocencio Cortés Martínez

Director:

Dr. Magdaleno Caballero Caballero



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 20 del mes de noviembre del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal”**

Cortés Apellido paterno	Martínez materno	Carlos Inocencio nombre(s)
Con registro: B 0 7 1 1 2 5		

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

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

LA COMISION REVISORA
Director de tesis

(Signature)
Dr. Magdaleno Caballero Caballero

(Signature)
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

(Signature)
Dr. Juan Alejandro Vásquez Feijoo

(Signature)
Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón

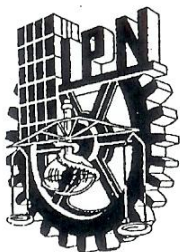
(Signature)
Dr. Luis Héctor Hernández Gómez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

(Signature)
Dr. Juan Rodríguez Ramírez



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

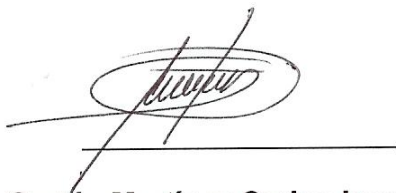


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 20 del mes noviembre **del año 2009**, el (la) que suscribe **Cortés Martínez Carlos Inocencio** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B071125**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Magdaleno Caballero Caballero y cede los derechos del trabajo titulado: **“Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal”**. al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó solemia7@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Cortés Martínez Carlos Inocencio



RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de la determinación de las propiedades mecánicas a tensión en las fibras obtenidas del bagazo del *Agave angustifolia* Haw. La metodología inició con la colecta de bagazo y extracción de las fibras a través del proceso de enriado, con secado a la sombra, y la extracción de fibra testigo de las pencas en estado verde. Posteriormente, se obtuvieron imágenes de la sección longitudinal y transversal por microscopía óptica para determinar el diámetro aparente y el área de la sección transversal. Enseguida, se realizaron ensayos de tensión cuyo objetivo fue evaluar el comportamiento de sus propiedades mecánicas bajo las siguientes condiciones de prueba: 1) en tres rangos de diámetro (0.20-0.39, 0.40-0.59 y 0.60-0.79 mm) y longitud constante; 2) en tres diferentes longitudes (10, 15 y 20 mm) y diámetro constante, 3) en tres velocidades de ensayo (1, 5, y 50 mm/min) y 4) en dos tipos de fibra, longitud, rango de diámetro y velocidad constantes. Por una parte, los resultados muestran que la sección transversal de las fibras del bagazo tienen forma de listón y por otra, los ensayos de tensión muestran que: la resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria a la rotura aumentan con el incremento del diámetro; la resistencia última a la tensión y la deformación unitaria a la rotura disminuyen con el incremento de la longitud, mientras que el módulo de elasticidad aumenta; la resistencia última a la tensión así como el módulo de elasticidad aumentan con el incremento de la velocidad, mientras que la deformación unitaria a la rotura disminuye; comparativamente la fibra testigo obtenida de las pencas en estado verde presenta una resistencia última a la tensión de 86.50 MPa, módulo de elasticidad de 1.02 GPa y deformación unitaria a la rotura de 0.38 mm/mm que es mayor a la fibra del bagazo con el mismo intervalo de diámetro que fue ensayado. En promedio, la fibra de bagazo presenta una resistencia última a la tensión de 86.51 MPa, módulo de elasticidad de 1.26 GPa, deformación unitaria a la rotura de 0.26 mm/mm y un comportamiento semilineal de la curva de esfuerzo-deformación.

Palabras clave: fibra, bagazo, *Agave angustifolia* Haw, propiedades mecánicas a tensión.

ABSTRACT

This work present the results of the determination of the mechanical properties to tension of the fibers obtained of the bagasse of the *Agave angustifolia* Haw. The methodology started with the collection of bagasse and extraction of fibers through the process of retting, with drying in the shade, and the extraction of fiber control of the fleshy leaves in unripe status. At a later time, was obtained images of the longitudinal and transverse section for optical microscopy to determine the apparent diameter and the area of the cross section. At once, tensile test were carried out whose objective was to evaluate the behavior of its mechanical properties under the following test conditions: 1) in three different intervals of diameter (0.20-0.39, 0.40-0.59 y 0.60-0.79 mm) and constant length; 2) in three different lengths (10, 15 and 20 mm) and constant diameter, 3) in three test speed (1, 5, and 50 mm/min) and 4) in two fiber type, diameter, length and test speed constant. On the one hand, the results evidence that the cross section of the fibers of the bagasse has form of ribbon and for the other one, tension tests evidence the following: the ultimate tensile strength and the modulus of elasticity increase with the increment of the diameter; the ultimate tensile strength and the unitary deformation at breaking decrease with the increment of the length, while the modulus of elasticity increases; the ultimate tensile strength as well as the modulus of elasticity increase with the increment of velocity, while the modulus of elasticity decrease; Comparatively, the fiber control obtained of the fleshy leaves in unripe status presents the ultimate tensile strength of 86.50 MPa, modulus of elasticity of 1.02 GPa and unitary deformation of 0.38 mm/mm that is major to the fiber of the bagasse with the same interval of diameter that was tested. On the average, the fiber of bagasse present a ultimate tensile strength of 86.51 MPa, modulus of elasticity of 1.26 GPa, unitary deformation at breaking of 0.26 mm/mm and a semi-linear behavior of the curve of stress-unitary deformation.

Keywords: fiber, bagasse, *Agave angustifolia* Haw, tensile mechanical properties.

AGRADECIMIENTOS

Al instituto Politécnico Nacional, por la valiosa oportunidad para superarme académicamente al ser aceptado en la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca.

Al Dr. Magdaleno Caballero Caballero y al M. en C. Luis Silva Santos, por el apoyo y el espacio para realizar mis estudios académicos, y sus valiosas sugerencias para el enriquecimiento del contenido de este trabajo de tesis.

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

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI), por la oportunidad de ser becario en el proceso de mi formación académica como Maestro en Ciencias a través de la participación en el proyecto de Investigación: “Investigación y Desarrollo Tecnológico para el Aprovechamiento de Fuentes de Energía no Convencionales en Procesos Artesanales de Baja Escala”, Clave SIP: 20090624, dirigido por el Dr. Magdaleno Caballero Caballero.

Al laboratorio de Tecnología de Alimentos del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca, por las facilidades otorgadas para realización de las pruebas de laboratorio, particularmente a la M. en C. Aymara Judith Díaz Barrita por la atención brindada.

A los integrantes del comité revisor: Dr, Magdaleno Caballero Caballero Caballero, Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez, Dr. Juan Alejandro Vásquez Feijoo, Dr. Luis Héctor Hernández Gómez y Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón por el tiempo dedicado para la mejora de esta tesis.

A mis compañeros de maestría: José Luis Montes Bernabé, Isaí López Hernández, Armando José José y Rey Fernando García Méndez, por su valiosa colaboración en campo para realizar las actividades de este proyecto de tesis. De igual forma a los compañeros de servicio social: Carmelo Julián de Jesús, María de Jesús García Rodríguez y Bartolomé García Zárate por su ayuda para la realización de los ensayos de laboratorio.

DEDICATORIA

A Dios, agradezco humildemente por esta nueva oportunidad para crecer, bajo su protección y cuidado.

A mi madre, por su comprensión en todo momento de falta.

A los amigos, por su valioso consejo y ayuda para reflexionar en momentos de duda e incertidumbre.

A Aleida Deni, por su valiosa compañía, amor y confianza.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
PROBLEMÁTICA.....	xvi
JUSTIFICACIÓN.....	xvii
OBJETIVO GENERAL.....	xix
HIPÓTESIS.....	xx
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Estadísticas del bagazo del <i>Agave angustifolia</i> Haw.....	2
1.2. Proceso para obtener bagazo residual y fibra.....	4
1.3. Clasificación e importancia de las fibras naturales.....	7
1.4. Usos industriales de las fibras vegetales.....	11
1.5. Importancia del conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de las fibras vegetales.....	12
1.6. Sumario.....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Mecánica de materiales.....	16
2.1.1. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria.....	16
2.1.2. Esfuerzo.....	17
2.1.3. Deformación unitaria.....	17
2.1.4. Resistencia última a la tensión.....	17
2.1.5. Módulo de elasticidad.....	18
2.2. Propiedades mecánicas de los materiales biológicos.....	18
2.3. Comportamiento viscoelástico en las fibras vegetales.....	19
2.4. Factores que afectan las propiedades a tensión de las fibras.....	22
2.4.1. Influencia del diámetro.....	22
2.4.2. Influencia de la longitud.....	23
2.4.3. Forma de la sección transversal.....	24
2.5. Propiedades mecánicas a tensión de las fibras vegetales.....	24
2.6. Sumario.....	26
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	27
3.1. Metodología.....	28
3.2. Equipos e instrumentos de medición.....	30

3.2.1. Microscopio óptico.	30
3.2.2. Máquina universal para prueba de materiales.....	31
3.3. Adquisición de datos	32
3.4. Consideraciones experimentales.....	33
3.5. Descripción de la gama donde se tomaron las muestras.....	33
3.6. Tiempo de cosecha	34
3.7. Época del año en que se realizó el análisis	34
3.8. Sumario.....	34
CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
4.1. Colecta de bagazo residual	36
4.2. Determinación del tamaño de la muestra.....	37
4.3. Extracción de las fibras del bagazo y selección de unidades experimentales.....	38
4.4. Caracterización física	40
4.4.1. Longitud.....	40
4.4.2. Diámetro aparente	40
4.4.3. Forma y área de la sección transversal.....	41
4.5. Ensayos de tensión	42
4.5.1. Diseño de experimentos.....	42
4.5.2. Determinación del número de probetas.....	44
4.5.3. Procedimiento experimental.....	45
4.6. Análisis de resultados.....	46
4.7. Sumario.....	48
CAPÍTULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS	49
5.1. Caracterización física	50
5.1.1. Longitud.....	50
5.1.2. Diámetro aparente	50
5.1.3. Área de la sección transversal	51
5.1.4. Identificación de la forma de la sección transversal.....	53
5.2. Ensayos de tensión	54
5.2.1. En función del diámetro.....	54
5.2.2. En función de la longitud.....	57
5.2.3. En función de la velocidad	59

Tesis de Maestría

5.2.4. En función del tipo de fibra.....	62
5.3. Sumario.....	64
DISCUSIÓN.....	66
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS.....	71
Anexo 1. Especificaciones técnicas de las mordazas.....	77
Anexo 2. Medición de la longitud de las fibras.....	80
Anexo 3. Determinación del diámetro aparente de las fibras.....	82
Anexo 4. Determinación del área de las fibras.....	92
Anexo 5. Ensayos de resistencia a la tensión en tres diámetros.....	95
Anexo 6. Ensayos de resistencia a la tensión en tres longitudes.....	99
Anexo 7. Ensayos de resistencia a la tensión en tres velocidades.....	103
Anexo 8. Ensayos de resistencia a la tensión en dos tipos de fibra.....	107
Anexo 9. Participación en eventos internacionales y nacionales derivados del trabajo de investigación.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Serie histórica del bagazo de agave mezcalero en Oaxaca. 3

Figura 2. Serie histórica de la fibra del bagazo de agave mezcalero en Oaxaca. 3

Figura 3. a) Cosecha del Agave y b) Seccionado de piñas. 4

Figura 4. a) Cocción del agave y b) Molienda de agave hidrolizado. 5

Figura 5. a) Fermentación y b) Destilación. 6

Figura 6. Bagazo del *Agave angustifolia* Haw. 7

Figura 7. Fibra obtenida del bagazo del *Agave angustifolia* Haw. 7

Figura 8. Clasificación de las fibras naturales. 8

Figura 9. Componentes del 50 Mercedes-Benz E-Class elaborados con fibras naturales. 12

Figura 10. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria. 16

Figura 11. a) Resorte; b) Amortiguador. 19

Figura 12. Modelo de Maxwell del comportamiento viscoelástico. 19

Figura 13. Curva típica de esfuerzo-deformación para fibras de coco. 20

Figura 14. Curva típica de esfuerzo-deformación de fibras de Piassava. 20

Figura 15. Influencia de la variación de la tensión por la velocidad en fibras de Carauá. 21

Figura 16. Influencia del diámetro en las propiedades mecánicas de la fibra de coco. 23

Figura 17. Influencia de la longitud en las propiedades mecánicas de la fibra de coco. 23

Figura 18. Sección transversal de la fibra de Henequén: a) renal; b) elíptica; c) círculo. 24

Figura 19. Esquema de un compuesto reforzado con fibra. 25

Figura 20. Diagrama de la metodología. 29

Figura 21. Microscopio óptico y cámara fotográfica. 30

Figura 22. Máquina universal de pruebas Instron 4442. 32

Figura 23. Texturómetro Instron modelo 4442 y cámara fotográfica. 32

Figura 24. Cuarteo del montículo de bagazo. 36

Figura 25. Secado natural de bagazo. 37

Figura 26. Obtención de fibras del bagazo del agave. 39

Figura 27. Secado de fibras. 39

Figura 28. Medición de la longitud. 40

Figura 29. Medición del diámetro aparente. 41

Figura 30. a) Alineación de las fibras individuales; b) Apriete de las mordazas. 46

Figura 31. a) presentación de los resultados del ensayo; b) rotura de fibras individuales. 46

Figura 32. Histograma de longitudes. 50

Figura 33. Sección transversal de las fibras de bagazo del intervalo D_1 (0.20-0.39 mm). 52

Figura 34. Sección transversal de las fibras de bagazo del intervalo D_2 (0.40-0.59 mm).....	52
Figura 35. Sección transversal de las fibras de bagazo del intervalo D_3 (0.60-0.79 mm).....	52
Figura 36. Sección transversal de la fibra de bagazo (100x).	53
Figura 37. Arreglo microestructural de la fibra de bagazo (500x).	53
Figura 38. Influencia del diámetro en la resistencia última a tensión.	55
Figura 39. Influencia del diámetro en el módulo de elasticidad.	55
Figura 40. Influencia del diámetro en la deformación unitaria.....	55
Figura 41. Curva típica esfuerzo deformación unitaria con tres diferentes diámetros.	56
Figura 42. Influencia de la longitud en la resistencia última a la tensión.....	57
Figura 43. Influencia de la longitud en el módulo de elasticidad.....	58
Figura 44. Influencia de la longitud en la deformación unitaria.	58
Figura 45. Curva típica esfuerzo-deformación unitaria con tres longitudes de ensayo.	59
Figura 46. Influencia de la velocidad en la resistencia última a tensión.....	60
Figura 47. Influencia de la velocidad en el módulo de elasticidad.	60
Figura 48. Influencia de la velocidad en la deformación unitaria.	61
Figura 49. Curvas típicas esfuerzo-deformación unitaria con tres velocidades.....	62
Figura 50. Influencia del tipo de fibra en la resistencia última a tensión.	63
Figura 51. Influencia del tipo de fibra en el módulo de elasticidad.....	63
Figura 52. Influencia del tipo de fibra en la deformación unitaria.....	63
Figura 53. Curva típica esfuerzo-deformación unitaria con dos tipos de fibra.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficie sembrada de agave.....	2
Tabla 2. Producción agrícola de agave mezcalero, bagazo y fibra en Oaxaca.....	2
Tabla 3 . Lista de importantes biofibras.....	9
Tabla 4. Propiedades físicas de algunas fibras vegetales.....	22
Tabla 5. Valores promedios provistos de hojas técnicas de datos para fibras de aramida, carbón, vidrio y fibras vegetales.....	26
Tabla 6. Características de la máquina universal Instron 4442.....	31
Tabla 7. Diseño experimental.....	42
Tabla 8. Variables de ensayo seleccionadas.....	43
Tabla 9. Determinación del tamaño de muestra por la norma NMX-069-1990.....	45
Tabla 10. Resultados de la medición del diámetro aparente.....	51
Tabla 11. Resultados de la medición del área de la sección transversal.....	51
Tabla 12. Resultados de los ensayos de tensión en función del diámetro.....	54
Tabla 13. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con tres diámetros.....	56
Tabla 14. Resultados de los ensayos de tensión en función de la longitud.....	57
Tabla 15. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con tres longitudes.....	59
Tabla 16. Resultados de los ensayos de tensión en función de la velocidad.....	60
Tabla 17. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con tres velocidades.....	61
Tabla 18. Resultados de los ensayos de tensión en función del tipo de fibra.....	62
Tabla 19. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con dos tipos de fibra.....	64
Tabla 20. Aplicaciones para las fibras del bagazo del Agave angustifolia Haw.....	67
Tabla 21. Comparativo de propiedades mecánicas a tensión de fibras vegetales.....	68

SIMBOLOGIA

ε = deformación unitaria

σ = esfuerzo

A = área de la sección transversal

F = fuerza perpendicular a la superficie.

E = módulo de elasticidad.

L_f = longitud final.

L_i = longitud inicial.

RUT = resistencia última a la tensión.

ME = módulo de elasticidad.

DU = deformación unitaria a la rotura.

Desv. Est. = desviación estándar.

D_1 = diámetro aparente 1, de 0.20 a 0.39 mm.

D_2 = diámetro aparente 2, de 0.40 a 0.59 mm.

D_3 = diámetro aparente 3, de 0.60 a 0.79 mm.

L_1 = longitud de ensayo 1, 10 mm.

L_2 = longitud de ensayo 2, 15 mm.

L_3 = longitud de ensayo 3, 20 mm.

v_1 = velocidad 1, 1 mm/min.

v_2 = velocidad 2, 5 mm/min.

v_3 = velocidad 3, 50 mm/min.

r = coeficiente de correlación.

F = prueba estadística.

Z = nivel de confianza.

p = variabilidad positiva.

q = variabilidad negativa.

N = tamaño de la población.

E = precisión o el error.

n = tamaño de muestra.

α = probabilidad.

FB = fibra de bagazo, extraída del bagazo de las pencas después de la fase de destilación.

FT = fibra testigo, extraída de las pencas en estado verde.

INTRODUCCIÓN

El *Agave angustifolia* Haw, es dentro de la familia de las agaváceas la de mayor cultivo para la elaboración de mezcal. Según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, 2006), el Estado de Oaxaca contaba con aproximadamente 16 185 hectáreas cultivadas de *Agave angustifolia* Haw hasta el 2006. Esta variedad de tarda aproximadamente 8 años en lograr el crecimiento y durante este tiempo el productor invierte recursos económicos, tiempo y energía para alcanzar la meta de producción de mezcal. El mercado de este producto no ha tenido un crecimiento sostenido por lo que los productores buscan obtener productos alternos y un mejor aprovechamiento de esta planta.

El uso de las fibras del bagazo a nivel industrial, representa una alternativa para complementar la economía de los productores; sin embargo no existen estudios sistematizados sobre la resistencia mecánica a tensión en fibras obtenidas del bagazo del *Agave angustifolia* Haw. Ya se han realizado investigaciones de las propiedades mecánicas a tensión en fibras provenientes de plantas como Piassava, Curauá, la corteza del Coco, Sisal, Luffa Cilíndrica y residuos agroindustriales como el bagazo de caña de azúcar (Satyanarayana et al., 2007); en la fibra de Flax se han determinado algunas propiedades mecánicas a tensión en función de su localización en la planta (Charlet et al., 2007); así como características físico-químicas, mecánicas y microestructurales de las fibras obtenidas de *Rhectophyllum Camerunense* (Beakou et al., 2008).

Hasta ahora, el empleo de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw en aplicaciones industriales no se ha visto por la falta de conocimiento de sus propiedades, principalmente la resistencia a la tensión; a diferencia de las fibras del *Agave sisalana* (Mukherjee y Satyanarayana, 1984), *Agave fourcroydes* (Cazaurang et al., 1991), *Agave lechuguilla* (Juárez et al., 2003) y *Agave americana* (Bessadok et al., 2008), en donde se tiene un conocimiento de estas propiedades. Siendo necesario conocer y diferenciar el comportamiento de propiedades como la resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria a la rotura de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw frente a la variación de sus características físicas, ya que aunque pertenecen a la misma familia de las agaváceas su comportamiento es diferente por ser productos de la naturaleza.

En este trabajo se estudio el comportamiento de las propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw variando el diámetro, longitud, velocidad y tipo de fibra y se determinó el comportamiento característico de las curva esfuerzo-deformación unitaria. Para ello se monitoreó el proceso para obtener el bagazo residual, se colecto el bagazo, se extrajo y limpio la fibra; posteriormente se hizo uso de la microscopia óptica para medir el diámetro aparente, área de la sección transversal y para determinar la forma de la sección transversal; se efectuaron ensayos de tensión usando una máquina universal de pruebas y se analizaron los resultados realizando un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA).

Esta tesis está estructurada en cinco capítulos, el primer apartado trata sobre las estadísticas del bagazo del *Agave angustifolia* Haw y el proceso que da origen a este residuo, las fibras industriales, su importancia, sus usos y sus propiedades físico-mecánicas; posteriormente en el capítulo dos se desarrolla la teoría sobre la mecánica de los materiales biológicos y las propiedades mecánicas a tensión en las fibras vegetales; después se presenta el capítulo tres en el cual se muestra la metodología de investigación que comprende desde la colecta del bagazo para la extracción de fibras hasta la realización de las ensayos de tensión; dentro del capítulo cuatro se presenta una descripción del desarrollo de las actividades comprendidas en la metodología, que concluyen con los ensayos a tensión; por último en el capítulo cinco se presentan el análisis estadístico de los resultados con los cuatro tratamientos realizados.

PROBLEMÁTICA

El bagazo es un residuo fibrovascular que se obtiene de la destilación de los jugos fermentados de agave y las pencas de agave, el cual está compuesto de fibra, médula y residuos líquidos cuya calidad y características no permiten reincorporarlo al proceso del mezcal, por lo que es acumulado gradualmente en forma de montículos en la cercanía de las mezcaleras, se envía a los campos de cultivo donde quedan grandes volúmenes abandonados sin ningún tratamiento o se vierte en ríos y arroyos por la falta de espacios y procedimientos para confinar y tratarlos; Asimismo su composición química lo hace resistente a la acción de microorganismos y biodegradación (Baena-González, 2005, p. 2). Una menor parte se utiliza en las comunidades productoras como combustible doméstico para la cocción de alimentos y forraje para animales, entre otros usos.

Si bien es cierto este es un problema de manejo de residuos, el problema es mayor, porque debido a la falta de conocimiento sobre sus propiedades, este residuo no se ha aprovechado a nivel industrial para mejorar el ingreso de los productores. El bagazo contiene materiales biológicos como son las fibras que con el debido estudio de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas pueden ser utilizadas para elaborar desde compuestos reforzados para la industria automotriz, compuestos para la industria de la construcción, geotextiles hasta materiales bioabsorbentes para captar el petróleo derramado en playas, mares y ríos, entre otros.

Sin embargo, se necesita de un estudio sistematizado acerca de las variaciones físicas de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw y su efecto sobre las propiedades mecánicas a tensión para utilizarlas adecuadamente al transferirlas a la matriz de un compuesto o al combinarlas con resina para formar tableros aglomerados debido a que la característica general de las fibras naturales es la variabilidad de la longitud, diámetro y morfología del espécimen tomando distintas formas estructurales en la sección transversal, lo que dificulta su uso en aplicaciones industriales.

JUSTIFICACIÓN

En México se consideran siete estados como principales productores de *Agave angustifolia* Haw, donde actualmente el estado de Oaxaca destaca como el mayor productor. Según datos, el estado de Oaxaca contaba con una superficie sembrada de 16 185 hectáreas de agave mezcalero, de la cual la superficie cosechada fue de 3 411 hectáreas, equivalentes a 222 473 toneladas de agave (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, 2006). Con este volumen cosechado se ha determinado que en el año 2006, se desecharon 49 155 toneladas de bagazo que contenían 7 040 toneladas de fibra. Es decir, por tonelada de agave se obtiene 3.1% de fibra.

Las fibras de este bagazo pueden ser aprovechadas, ya que está disponible la mayor parte del año, su valor es limitado y su uso está sustentado por la tendencia actual al reemplazo de las fibras sintéticas por las naturales, debido a las ventajas que en conjunto presentan las fibras naturales. Sin embargo las fibras no se extraen para ser utilizadas a nivel industrial debido a que no existen estudios sistematizados, principalmente sobre las propiedades mecánicas a tensión.

El conocimiento sobre las características físicas y propiedades mecánicas de las fibras vegetales es necesario pues como sucede con otras plantas que pertenecen a la misma familia de las agaváceas y de las cuales se extraen fibras como el *Agave sisalana* (Mukherjee y Satyanarayana, 1984), *Agave fourcroydes* (Cazaurang et al., 1991), *Agave lechuguilla* (Juárez et al., 2003) y el *Agave americana* (Bessadok et al., 2008), el conocimiento de sus atributos mecánicos a tensión ha potencializado su uso en diferentes aplicaciones industriales; al igual que sucede en México con las fibras obtenidas de residuos similares al bagazo del *Agave angustifolia* Haw como el rastrojo de la piña o el bagazo de la piña de Henequén, que son aprovechadas por sus cualidades mecánicas en la elaboración de tableros y materiales compuestos (Balam-Cocom et al., 2006).

Con esta investigación se generó conocimiento acerca de las variaciones físicas y su efecto sobre las propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw. Este estudio dará lugar a futuros trabajos de investigación, diseño de máquinas y procesos tecnológicos para su transformación y elaboración de nuevos productos; además de

diversificar el uso de esta planta en aplicaciones que contribuyan a la economía de los productores de agave y mezcal.

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la resistencia última a la tensión (RUT), el módulo de elasticidad (ME) y la deformación unitaria a la rotura (DU) de las fibras del bagazo de *Agave angustifolia* Haw, obtenidas del proceso artesanal de elaboración de mezcal, en función de su diámetro, longitud, velocidad de deformación y en fibras testigo obtenidas de las pencas en estado verde.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el diámetro aparente, el área y la forma de la sección transversal de la fibra del bagazo por medio de un análisis de microscopía óptica.
2. Analizar el efecto del diámetro y longitud en su resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria a la rotura.
3. Analizar el efecto de la velocidad de deformación en la resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria a la rotura.
4. Comparar la resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria a la rotura de las fibras del bagazo y las fibras testigo obtenidas de las pencas en estado verde.
5. Determinar el comportamiento característico a tensión de las curvas esfuerzo-deformación unitaria.

HIPÓTESIS

H1: La resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria a la rotura de las fibras del bagazo están influenciadas por la variación de su diámetro y longitud.

H2: Con la variación de la velocidad de deformación, la fibra presenta dos comportamientos: como un cuerpo viscoso a baja velocidad y como un cuerpo elástico cuando se aumenta, lo que se refleja en un incremento en la resistencia última a la tensión y el módulo de elasticidad.

H3: La resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria a la rotura en la fibra obtenida de la penca son mayores que en la fibra obtenida del bagazo.



CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

En este primer apartado se realiza una descripción de la estadística del bagazo del *Agave angustifolia* Haw generado por la industria mezcalera, su uso actual, la clasificación de las fibras naturales y sus aplicaciones industriales, a partir de las cuales se realizan investigaciones encaminadas a determinar las propiedades físicas y mecánicas de nuevas fibras y mejorar las existentes.

1.1. Estadísticas del bagazo del *Agave angustifolia* Haw

Para evaluar el potencial del bagazo de *Agave angustifolia* Haw, como un proveedor de materia prima para diferentes productos, es necesario en primer lugar conocer el comportamiento agrícola a nivel nacional, estatal y regional de esta planta. A nivel nacional, en el año 2006 Oaxaca tuvo la mayor superficie sembrada de agave mezcalero, como se observa en el cuadro de la **Error! Reference source not found.**, seguido de Jalisco y Michoacán (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, 2006).

Tabla 1. Superficie sembrada de agave.

Estado	Superficie sembrada (ha)
Oaxaca	16 185
Jalisco	926
Michoacán	473
Sinaloa	163
Zacatecas	144
Otros	399

En el estado de Oaxaca la producción de agave se incrementó a partir de 1999 debido a los altos precios que pagaba la industria tequilera por el maguey maduro; dicho aumento se reflejó en una mayor producción de la planta que alcanzó las 300 100 toneladas en el 2003, descendiendo a 137 400 toneladas en el 2004 a causa de una sobreoferta proveniente de las plantaciones establecidas en los años 1998–2000 y a partir de este año nuevamente se incrementó la producción hasta 228 996 toneladas en el 2007. (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, 2007). En el estado de Oaxaca, siete distritos conforman la región del mezcal, de los cuales Yautepec aporta la mayor producción de agave mezcalero, debido a su alto rendimiento tonelada/hectárea. Por su parte, Tlacolula tiene la mayor superficie sembrada. Esta información se expone en la tabla 2.

Tabla 2. Producción agrícola de agave mezcalero, bagazo y fibra en Oaxaca.

Distritos	Superficie sembrada (Ha)	Superficie cosechada (Ha)	Producción de agave (Ton)	Producción de bagazo (Ton)	Fibra de bagazo (Ton)
Tlacolula	4 888	829	47 970	10 598.9	1 658
Yautepec	4 479	1 173	82 110	18 142.2	2 346
Miahuatlán	1 629	372	22 320	4 931.6	744
Ejutla	1 228	80	4 800	1 060.5	160
Sola de vega	2 143	645	38 700	8 550.7	1290
Ocotlán	535	65	3 956	874.0	130
Zimatlán	497	181	13 253	2 928.3	362
Otros	786	66	9 363	2 068.9	132
TOTAL	16 185	3 411	222 473	49 155.4	7 040

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, (2006).

El aprovechamiento de esta planta se centra en la producción de mezcal, proceso en el que sólo el tallo, que equivale al 45% del peso total de la planta, es usado (Silva-Santos et al., 2009), mientras que el bagazo que se desecha equivale al 49% del peso del tallo y por cada hectárea de agave cosechado se obtienen 14.41 toneladas de bagazo. En base a los datos históricos del agave, la producción de bagazo de agave mezcalero, sigue el comportamiento de la figura 1.

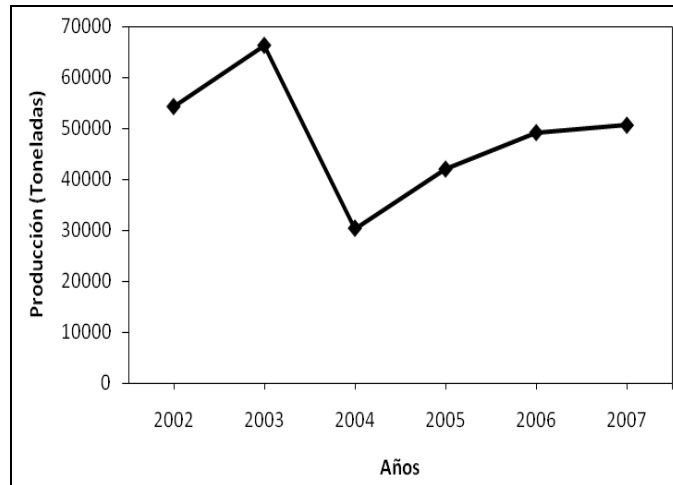


Figura 1. Serie histórica del bagazo de agave mezcalero en Oaxaca.

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, (2006).

En promedio es posible extraer 2 toneladas de fibras por cada hectárea de agave cosechado y el potencial en toneladas que no se aprovecha como sucedió en el año 2006, es de 7 040 toneladas/hectárea, como se muestra en la figura 2.

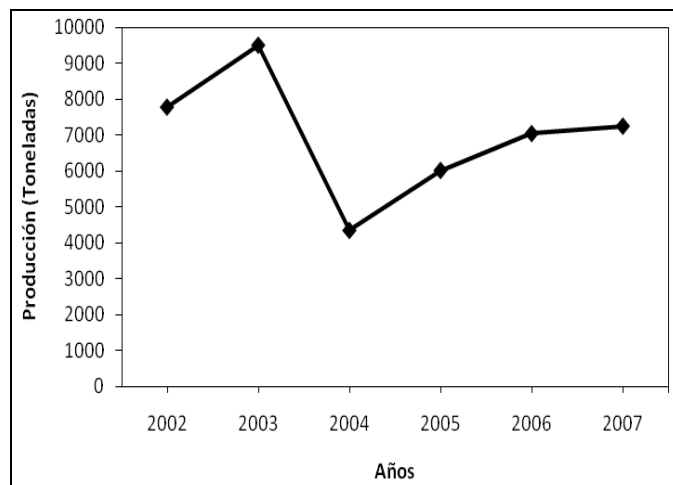


Figura 2. Serie histórica de la fibra del bagazo de agave mezcalero en Oaxaca.

Fuente: Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera, (2006).

Por tanto, según la información anterior, a nivel nacional, el estado de Oaxaca posee el mayor potencial de bagazo obtenido del *Agave angustifolia* Haw que se tira como residuo y que no ha sido aprovechado para obtener fibras.

1.2. Proceso para obtener bagazo residual y fibra

El bagazo residual se obtiene a partir de la destilación del mezcal, en este caso mediante el proceso artesanal, sigue las siguientes fases: a) cosecha del agave, b) seccionado de las piñas, c) cocción del agave, d) molienda del agave hidrolizado, e) fermentación del jugo y bagazo y f) destilación de mosto y bagazo.

El proceso del cual se realizó la colecta de bagazo para la extracción de fibras para este trabajo de investigación, inicia en los campos de cultivo con el corte de las hojas y cosecha de piñas de agave utilizando herramientas de mano como machetes, hachas y barretas y el esfuerzo físico de los productores. En esta etapa se cosecharon lotes de 3 a 6 toneladas de piñas (figura 3a). Como preparación para la cocción se seccionaron las piñas en cuartos o mitades, como se observa en la figura 3b.

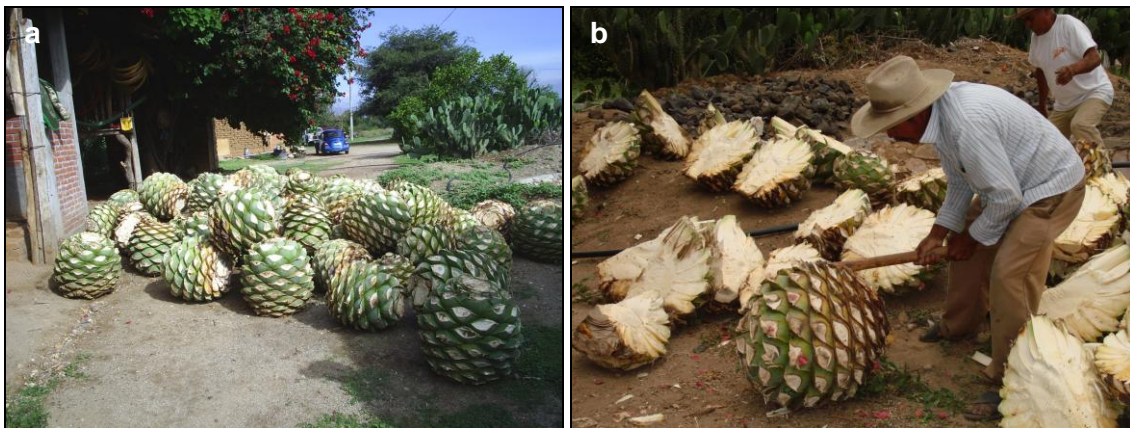


Figura 3. a) Cosecha del Agave y b) Seccionado de piñas.

La cocción de las piñas se realizó en un horno cónico truncado bajo tierra de 6 toneladas de capacidad como se aprecia en la figura 4a, en cuyo fondo se formó un montículo de bagazo y leña que se cubrió de una capa de rocas. Una llama directa sobre el montículo de leña inició el fuego y las rocas se cubrieron de una capa de bagazo sobre la cual se colocaron las piñas seccionadas, cubriéndolas con bagazo y tierra. En esta etapa el calor generado por la leña alcanzó una temperatura de 800° C, mientras que en las pencas del agave hidrolizado de

donde se extrae la fibra alcanzó una temperatura de cocción de 97° C. Esta etapa duró una semana hasta el destape del horno y sometió a la fibra a un primer cocimiento.

Como preparación para la molienda, se realizó el seccionado del agave hidrolizado con machete; en trozos de 50 a 150 mm de longitud y de formas irregulares; posteriormente los trozos de agave se procesaron con una máquina forrajera que se muestra en la figura 4b, donde se someten a esfuerzos de corte y flexión por la acción de los martillos y navajas, montadas en el mecanismo de la máquina a fin de separar mecánicamente la médula de la fibra y de esa forma obtener el trozo de agave desgarrado y jugos de agave.



Figura 4. a) Cocción del agave y b) Molienda de agave hidrolizado.

La mezcla de jugo de agave y agave desgarrado, es depositado en tanques de plástico para iniciar la etapa de fermentación (figura 5a). Estos tanques son de grado alimento y se les agrega agua para esperar a que el proceso de fermentación se desarrolle a manera natural por un periodo aproximado de una semana. En esta etapa, la mezcla se expone a la acción de los siguientes efectos principales que flexibilizan el haz fibroso:

- a) Producción de microorganismos
- b) Hidratación del material fibroso
- c) Descomposición debido a los microorganismos que provocan la fermentación.

En la etapa de destilación se depositaron de 167 a 200 kg de la mezcla y 76 l de mosto fermentado en alambiques de cobre con una temperatura inicial de la mezcla de 21° C. El periodo de destilación en promedio duró 7.5 horas y alcanzó una temperatura en la hoguera de

444° a 490° C, y 94° C en la mezcla con fibra (figura 5b), lo que a su vez sometió a un segundo cocimiento el haz fibroso del bagazo.



Figura 5. a) Fermentación y b) Destilación.

Al final de la etapa de destilación, queda en el fondo de los alambiques de destilación, la cantidad de fibra aún con porciones de médula que contienen azúcar. A este material se le denomina bagazo. Dicho de otra forma, el bagazo del agave que se desecha al final del proceso artesanal de elaboración de mezcal, es un haz fibrovascular que queda de los residuos de los trozos de las pencas y el corazón del tallo de las plantas, conocido como piña una vez que se cortan las hojas.

Este residuo no se reincorpora nuevamente en el proceso. En las comunidades se utiliza una parte como combustible doméstico, compostaje de la planta y como forraje para animales entre otros usos, almacenando la mayor parte en forma de montículos en la parte posterior de los palenques y regresada a los campos.

Como el bagazo es tratado como residuo y regresado a los campos, se expone a la humedad medioambiental y degradación química, en cuya composición química está presente la lignina que limita la degradación de la celulosa por microorganismos (Iñiguez-Covarrubias et al., 2001). Las comunidades productoras de agave en la región del mezcal señalan al bagazo como un contaminante del medio ambiente por los olores desagradables que se producen por su descomposición, como puede observarse en la figura 6.



Figura 6. Bagazo del *Agave angustifolia* Haw.

El bagazo utilizado en este estudio se obtuvo de la penca o base de la hoja y está constituido por manojos de fibra de 50 a 200 mm de longitud adheridas por residuos sólidos que en promedio posee 1950 fibras. La variación de la longitud depende de los equipos y procedimientos utilizados en cada uno de los tres procesos de elaboración de mezcal. Después de la separación de la médula y secado al sol (figura 7), la fibra se usa como relleno de colchones, se mezcla con arcilla para hacer ladrillos y se han realizado estudios para utilizarse como medio de cultivo en plantas, en forma pura y en diferentes mezclas con el polvo de coco y la vermiculita (Martínez-Gutiérrez et al., 2006).



Figura 7. Fibra obtenida del bagazo del *Agave angustifolia* Haw.

1.3. Clasificación e importancia de las fibras naturales

Como fibras naturales, se entienden los materiales fibrosos que pueden extraerse de la naturaleza, principalmente constituidos por celulosa y lignina, además de otros componentes

en menor cantidad como hemicelulosa y ceniza, por esta razón las fibras naturales también reciben el nombre de fibras lignocelulósicas. Por su origen las fibras naturales se clasifican en cuatro grupos (figura 8): fibras vegetales, fibras de animales o de proteína, fibras minerales y aquellas que son obtenidas de residuos agrícolas procedentes de plantas anuales o bien de plantas arbóreas madereras (Bodros y Baley, 2007).

Las fibras vegetales de mayor utilidad pueden clasificarse tomando en consideración su origen anatómico, su tipificación botánica y sus usos. Hay aquellas que son obtenidas de hojas, raíces, frutos, tallos y semillas. Los residuos agrícolas son las partes de las plantas que se quedan en el campo después de cosechar el cultivo principal y son fuente importante de fibras residuales por ser anualmente renovables, abundantemente disponibles y de valor limitado.

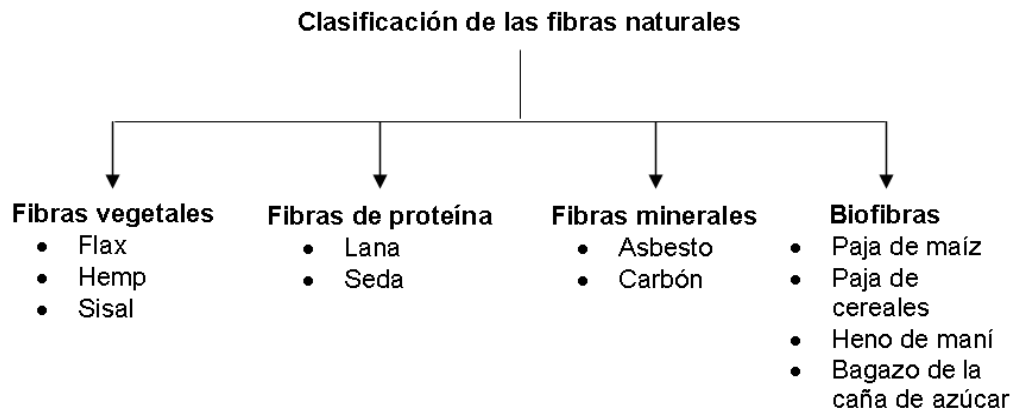


Figura 8. Clasificación de las fibras naturales.

El cuadro de la **Error! Reference source not found.** muestra una lista de las principales fibras obtenidas de plantas producidas en otros países, que son usadas como materia prima para la elaboración de productos industriales. La mayoría de las fibras naturales provienen de plantas que se encuentran en países en vías de desarrollo, como la India, China y algunos países latinoamericanos como Brasil, Colombia y México. Brasil posee un acervo de información importante de las fibras provenientes de plantas nativas como el bagazo de caña de azúcar, Yute, Piaçava, Curauá, la corteza del coco, Sisal y la Luffa Cilíndrica (Satyanarayana et al., 2007).

En México, numerosas especies de agaves son utilizados en la industria fibrera; como es el caso de la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), característica del desierto Chihuahuense; el henequén (*Agave fourcroydes*) de la península de Yucatán; el sisal de Chiapas y Yucatán

(*Agave sisalana*); el espadín de Oaxaca (*Agave angustifolia Haw*) y el zapupe tamaulipeco (*Agave angustifolia var. deweyana*), por citar algunos (Cervantes-Ramírez 2002).

Tabla 3 . Lista de importantes biofibras.

Fuente de fibra	Especie	Origen	Fuente de fibra	Especie	Origen
Abaca	Musa textiles	Hoja	Kapok	Ceiba pentrandra	Fruto
Bagazo	_____	Hierba	Kenaf	Hibiscus cannabinus	Tallo
Bamboo	(>1250 especies)	Hierba	Kudzu	Pueraria Thumbergiana	Tallo
Banana	Musa indica	Hoja	Mauritius hemp	Furcraea gigantea	Hoja
Broom root	Muhlenbergia macroura	Raiz	Nettle	Urtica dioica	Tallo
Cantala	Agave Cantala	Hoja	Oil palm	Elaeis guineensis	Fruto
Caroa	Neoglaziovia variegata	Hoja	Piassava	Attalea Funifera	Hoja
China jute	Abutilon theophrasti	Tallo	Pineapple	Ananus comosus	Hoja
Coir	Cocos nucifera	Fruto	Phormium	Phormium tenas	Hoja
Algodón	Gossypium sp.	Semilla	Roselle	Hibiscus sabdariffa	Tallo
Curauá	Ananas erectifolius	Hoja	Ramie	Boehmeria nivea	Tallo
Date palm	Phoenix Dactylifera	Hoja	Sansevieria	Sansevieria	Hoja
Flax	Linux usitatissimum	Tallo	Sisal	Agave Sisalana	Hoja
Hemp	Cannabis sativa	Tallo	Sponge gourd	Luffa cilynderica	Fruto
Henequen	Agave fourcroydes	Hoja	Stráw (cereal)		Tallo
Isora	Helicteres isora	Tallo	Sun Hemp	Corolaria juncea	Tallo
Istle	Samuela carnerosana	Hoja	Cadillo/urena	Urena lobata	Tallo
Jute	Corchorus capsularis	Tallo	Wood	(>10,000 especies)	Tallo

Fuente: Maya y Sabu, (2007).

Así mismo, las fibras extraídas de las hojas de los magueyes o agaves y otras plantas de la familia de las agaváceas o muy afines a ellas, reciben el nombre común de "ixtle" y debido a su resistencia son conocidas como "fibras duras", utilizadas en la elaboración de productos de uso

local como: cuerdas, costales, cepillos, morrales y muchos otros objetos, pero su uso disminuyó notablemente por el bajo costo y creciente uso de los plásticos técnicos y fibras sintéticas. Por ejemplo, en el siglo pasado las fibras vegetales extraídas de plantas como el *Agave sisalana* o el Henequén que se emplearon para la elaboración de cordeles, sacos, tapetes, morrales, ceñidores, redes de pesca y relleno de colchones, fueron desplazadas por materiales sintéticos como la fibra de vidrio y carbono.

Todavía más, con el agotamiento de los recursos petroleros, se ha venido reduciendo la fuente de la materia prima para la fabricación de dichos materiales sintéticos, mientras que las fibras vegetales aumentan su producción en aproximadamente doscientos mil millones (2×10^{11}) de toneladas de fibras vegetales lignocelulósicas contra ciento cincuenta millones de toneladas (1.5×10^8) de polímeros sintéticos producidos cada año (Mohanty et al., 2000). Respecto a esto, la fibra más abundante en el mundo es de la madera de árboles con una producción mundial anual de 1.75×10^9 toneladas sobre 10,000 especies. La producción de algodón en contraste, es de 18.5×10^6 toneladas, mientras el kenaf, flax, y cáñamo son 9.7×10^5 , 8.3×10^5 , y 2.1×10^5 toneladas, respectivamente (Holbery y Houston, 2006).

El yute es llamado también la "fibra dorada", es larga, suave y brillante, con una longitud de 1 a 4 metros y un diámetro de 17 a 20 micras. Es una de las fibras vegetales más resistentes. En términos de producción está en el segundo lugar, superado solo por el algodón. Dicha producción fluctúa cada año más que otras fibras, influenciadas por las condiciones climáticas y los precios de compra. En la década actual estuvo en el rango de 2.3 a 2.8 millones de toneladas.

La cantidad producida generalmente excede a la lana, pero en términos del valor, su orden está muy por debajo del rango de la lana. La India produce el 60% del Yute del mundo, Bangladesh es otro productor principal con 30%. Otros países, como Myanmar y Nepal, producen cantidades mucho más pequeñas. Kenaf, una fibra muy similar al yute, es producida en cantidades más pequeñas de alrededor de 500 000 toneladas predominantemente en países de Asia (FAO, 2007b).

Debido a la creciente utilización de las fibras vegetales, han sido desarrolladas nuevas tecnologías para el uso del yute como materia prima en producciones de alto valor agregado y se han desarrollado nuevos productos como textiles domésticos, materiales compuestos,

geotextiles, pulpa de madera, textiles técnicos, productos químicos, artesanías y accesorios de moda. La producción de sisal, henequén y fibras duras similares ha sido de aproximadamente 300 000 toneladas. Estas fibras son producidas de la hoja del agave y especies similares principalmente en África (Kenia, Tanzania y Madagascar), Latinoamérica (Brasil, México, Haití, Venezuela, y Cuba) y China.

La FAO (2007b) menciona que el aumento del precio del petróleo se ha reflejado en una fuerte tendencia ascendente en los precios del polipropileno que llegaron a 1 500 dólares estadounidenses por tonelada en septiembre de 2006; Comparativamente, en ese mismo año los precios de exportación de la fibra de yute se encontraron en 386 dólares estadounidenses por tonelada. En un estudio realizado por la FAO, (2007a) sobre la evolución paralela de los precios del yute y las fibras duras con los precios del polipropileno y el petróleo crudo, concluye que a largo plazo los precios del petróleo pueden continuar la tendencia ascendente; por consiguiente aumentaría la competitividad de las fibras naturales en comparación con el polímero de polipropileno. Por ahora, las fibras que tradicionalmente fueron utilizadas para la elaboración de cordeles y sacos (Yute, la fibra de corteza de coco, el Sisal y las fibras de Curauá), han encontrando nuevos mercados en un rango de usos que incluyen alfombras, materiales compuestos para la industria automotriz y de la construcción debido a su bajo costo (FAO, 2008).

1.4. Usos industriales de las fibras vegetales

La aplicación de las fibras vegetales es muy interesante económicamente, al agregarlas como material de refuerzo para formar los llamados biocompuestos de fibras para componentes de la industria automotriz, en partes interiores como paneles de puertas, forros, paneles de instrumentos, techos interiores, tapicería y descansos principales (Zah et al., 2007). En este sentido el consumo total de fibras naturales proyectado para el año 2010 en la industria automotriz europea se estima en 100 000 toneladas (Clemons y Caulfield 2005, p 196). La figura 9 muestra algunos componentes elaborados con fibras naturales como el Flax, hemp, sisal, lana, y otras para un modelo de automóvil de la marca Mercedes-Benz.

Para compuestos estructurales producidos de fibra natural, las principales fibras aplicadas son la de lino, kenaf, y cáñamo, debido a sus buenas propiedades mecánicas de resistencia a la tensión. Otras fibras como las extraídas del bagazo de la caña de azúcar son embebidas en un

molde con resina polyester para elaborar compuestos, utilizando longitudes que van de 1 a 80 mm (El-Tayeb, 2009).



Figura 9. Componentes del 50 Mercedes-Benz E-Class elaborados con fibras naturales

Fuente: Holbery y Houston, (2006).

Asimismo, en varios países del mundo, los científicos e investigadores se encuentran empeñados en la búsqueda de un material que reemplace el asbesto, tradicionalmente utilizado en la fabricación de materiales de construcción, especialmente tejas, debido a que este es un material con magníficas propiedades físicas, pero considerado cancerígeno, razón por la cual está prohibido en la mayoría de países. En la actualidad, los únicos materiales que han podido ser utilizados para reemplazar al asbesto en los materiales de construcción son las fibras naturales. Con este propósito se encuentran en estudio diferentes tipos de fibras, en varios laboratorios y universidades del mundo.

En Colombia el Grupo de Investigación sobre el fique, del departamento de materiales de ingeniería de la Universidad del Valle, durante varios años y con el financiamiento de Colciencias y el Fondo de Fomento Agropecuario del Ministerio de Agricultura, logró desarrollar un proceso que permite su aplicación como material de fibro-refuerzo en la fabricación de tejas. Este sistema se implementó en algunas comunidades rurales, pero por tratarse de un proceso de fabricación manual, no dio los resultados esperados.

1.5. Importancia del conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de las fibras vegetales

Una fibra es definida como uno de los hilos o filamentos que forman un tejido fino animal o vegetal y sustancia textil (Juztiz-Smith, et al., 2007), cuya función mecánica es impartir fuerza y

elasticidad al organismo de la planta (Esau, 1980; Fahn, 1990; Van Dan Y Gorshkova, 2003 referenciado por Chernova et al., 2007). La mayor desventaja de las fibras vegetales es su calidad altamente variable que depende de impredecibles condiciones agrícolas como: la edad de la planta, especie, variedad y condiciones climatológicas para su desarrollo, su baja resistencia a la tensión (Zah et al., 2007) que está sujeta a la composición química, estructura, variaciones físicas y defectos que influyen en su resistencia y finesa (Warner, 1995, Reddy y Yang, 2005) y por ejemplo: con el incremento del diámetro, la resistencia a la tensión disminuye y el módulo de elasticidad se incrementa y para darle un uso industrial las fibras requieren mayor resistencia, módulo y uniformidad que las fibras de uso textil, por lo que es necesario controlar mejor su diámetro para minimizar la variabilidad (Warner, 1995) de fibra a fibra y a lo largo de las mismas. Esto es característico de los diversos frutos y vegetales. Como ejemplo se puede mencionar el caso del melón (Villaseñor-Peroa et al., 2006).

Diversas propiedades químicas, físicas y mecánicas de algunas fibras, han sido evaluadas en países como Brasil, India, Colombia y México como una parte del desarrollo de materiales compuestos. Sin embargo, estos estudios no han sido efectuados de manera sistemática en posición, tamaño (diámetro o longitud), exposición medioambiental y otras propiedades útiles. Algo único en este género es el trabajo actual en fibras brasileñas realizada por Satyanarayana et al., (2007) y trabajos en fibra de la corteza de coco y piacava.

Cabe mencionar el trabajo de Silva-Santos et al., (2009) en fibras obtenidas de las hojas del *Agave angustifolia* Haw bajo diferentes esquemas de ensayo y cuyos resultados muestran que las fibras exhiben un comportamiento viscoelástico además de que sus características se encuentran en el rango de fibras vegetales similares, las cuales son usadas por la industria en la fabricación de nuevos compuestos. Este trabajo se enfocó en determinar propiedades de la estructura exterior de las fibras extraídas del bagazo de *Agave angustifolia* Haw como son: longitud, diámetro, forma y área de la sección transversal, además de los efectos de la longitud de fibra, diámetro aparente y velocidad de deformación en las propiedades mecánicas a tensión.

1.6. Sumario

La producción de agave que se uso en el año 2006 para la elaboración de mezcal ascendió a 222 473 toneladas, generando 7 040 toneladas/hectárea de fibras de bagazo. En el proceso de producción artesanal de mezcal, la fibra somete a esfuerzos térmicos por la cocción y

destilación que la rigidizan, esfuerzos de corte y flexión por la molienda y la hidratación por la fermentación la flexibiliza. A raíz de la diversidad de especies de plantas y procesos industriales de los cuales se obtienen las fibras vegetales se desarrollan investigaciones orientadas a determinar sus principales propiedades, antes de utilizarlas en el desarrollo de nuevos productos como compuestos para la industria automotriz y de la construcción. Debido a que la calidad de las fibras depende de impredecibles condiciones agrícolas y su resistencia a la tensión está sujeta a la composición química, estructura, variaciones físicas y defectos, entre otros, siendo necesario conocer el efecto de estas variables para controlar mejor su diámetro y minimizar la variabilidad de fibra a fibra y a lo largo de las mismas.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se desarrolla el marco teórico que da sustento al trabajo de investigación a partir de una descripción de la mecánica de los materiales biológicos y las variables que influyen en las propiedades mecánicas a tensión de las fibras vegetales, y cuyo estudio es importante para interpretar los resultados que se obtuvieron de los ensayos en fibras extraídas del bagazo del *Agave angustifolia* Haw.

2.1. Mecánica de materiales

El estudio de las relaciones entre los esfuerzos, deformaciones unitarias, y propiedades de los materiales es llamado mecánica de materiales. Entre las propiedades mecánicas más comunes que se evalúan en los materiales están: módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al desgaste, resistencia al impacto y dureza. El ensayo de tensión es un método de prueba importante en el cual una carga uniaxial es aplicada a un material para determinar su comportamiento característico ante dicha fuerza.

2.1.1. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria

El diagrama esfuerzo-deformación unitaria (figura 10), es una representación gráfica de un ensayo de tensión. Describe el comportamiento mecánico del espécimen desde el inicio de la carga hasta el punto de rotura, lo que determina que el esfuerzo σ sea medido como una función de la deformación unitaria ϵ .

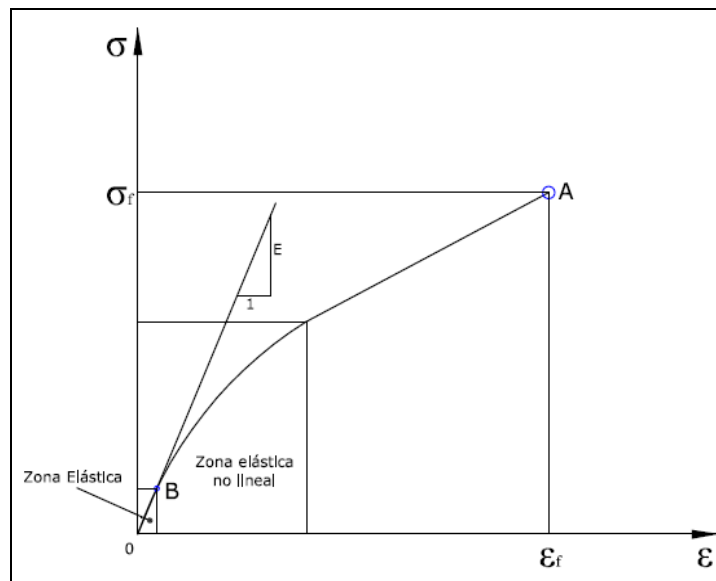


Figura 10. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria.

El mayor valor práctico de los ensayos de tensión reside en la obtención de datos para determinar propiedades mecánicas, como el límite elástico, el alargamiento porcentual, el módulo de elasticidad E , la resistencia en el punto de rompimiento, el punto de biocedencia, el rango plástico, el estudio de las curvas esfuerzo-deformación registradas y el análisis

comparativo de los comportamientos mecánicos que ellas representan (Moshenin, 1970). Por tales motivos, un estudio de las propiedades mecánicas resulta de suma importancia.

2.1.2. Esfuerzo

El esfuerzo σ es una medida de la fuerza perpendicular a la superficie (F) dividida por su área (A) y se expresa en MPa (N/mm^2) como unidad de medida, ec. (1); por lo que, el esfuerzo se estima con el área de sección original sin tener en cuenta los cambios en el área debido a la carga aplicada a un material.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

2.1.3. Deformación unitaria

La deformación unitaria ε es el desplazamiento axial o transversal entre dos puntos originado por la aplicación de una fuerza sobre un material. Dividido entre la longitud original de la probeta, obtenida por la ec. (2).

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (2)$$

Donde L_f es la longitud final y L_i es la longitud inicial. Cuando una fibra textil es sujeta a una carga de tensión sufre tres clases de deformación: 1) una deformación elástica, estrechamente proporcionada por la carga y completa e instantáneamente recuperable una vez removida la carga; 2) un arrastre primario, que aumenta a una tasa decreciente con el tiempo y la cual es completa, pero no instantáneamente recuperable una vez removida la carga; y 3) un arrastre secundario, que varía con el tiempo y carga, y es completamente irre recuperable una vez removida la carga. Las cantidades relativas de estos tres componentes actuando para producir la deformación total varía con distintas fibras. Los dos componentes inelásticos dan lugar a la histéresis mecánica en carga y descarga. (Avallone y Baumeister, 1999).

2.1.4. Resistencia última a la tensión

Es el valor de la carga específica bajo la cual la fibra se rompe y se expresa en MPa (N/mm^2) en el Sistema Internacional. Llamada también carga de rotura y con frecuencia, denominada

“resistencia última a la tensión” en el campo de las propiedades mecánicas de las fibras naturales y se localiza en el Punto A del diagrama en la figura 10.

2.1.5. Módulo de elasticidad

Es una medida de la esfuerzo necesario para producir un pequeño alargamiento del orden de $L = 1 \%$, definido como la tangente del ángulo entre la parte inicial de la curva cercana al origen y el eje horizontal, correspondiente a la zona de elasticidad de la curva esfuerzo-deformación unitaria. Esta razón es llamada también como módulo de Young y se expresa en GPa (N/mm^2). Los módulos elásticos de tensión y compresión son aproximadamente iguales. Como medida de rigidez, un alto módulo indica inextensibilidad y uno bajo corresponde a la flexibilidad (Ramírez-Rodríguez 2005).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{tg } \alpha \quad (3)$$

De manera gráfica el módulo de elasticidad o de Young se calcula trazando una pendiente a la curva respecto al origen y registrando los valores del esfuerzo y deformación, en el punto B donde se separa la pendiente de la curva (Figura 10).

2.2. Propiedades mecánicas de los materiales biológicos

Cuatro tipos de estados o comportamientos ideales se presentan en todos los alimentos reales, siendo estos: elástico ideal (sólido de Hooke), que describe la capacidad de un material de volver a su forma original cuando se suprime la carga que causa la deformación; plástico ideal (sólido de St. Venant), que muestra la tendencia de un material a permanecer deformado después de la reducción del esfuerzo deformante a un valor igual o inferior a su esfuerzo de fluencia; viscoso ideal (líquido Newtoniano); y el cuarto, el estado viscoelástico, que es una combinación de dos de ellos.

Un material elástico retorna inmediatamente a su forma original cuando la carga ha sido removida después de la deformación y se modela con resortes (figura 11a), en tanto un material plástico mantiene la deformación por siempre. Los materiales viscosos son modelados con amortiguadores (figura 11b) y los materiales viscoelásticos retornan lentamente a su forma original y son modelados con resortes y amortiguadores (Warner, 1995).

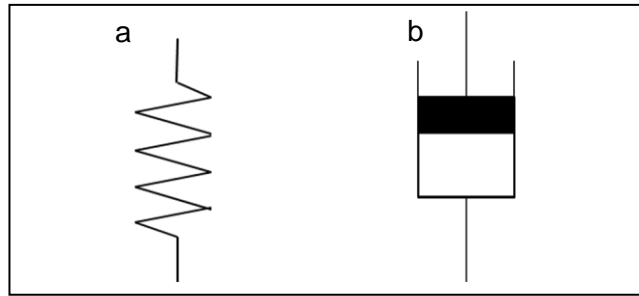


Figura 11. a) Resorte; b) Amortiguador.

2.3. Comportamiento viscoelástico en las fibras vegetales

El comportamiento viscoelástico es estudiado por la reología, que es definida como “la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia”, por lo que la aplicación de la teoría de la deformación es muy importante en el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas.

Los fundamentos matemáticos de la viscoelasticidad fueron establecidos por James C. Maxwell cuando trabajó con fibras de seda en una de sus investigaciones, proponiendo el modelo que lleva su nombre. Partió de dos elementos ideales, el primero explica la recuperación elástica de los cuerpos sometidos a tensión y está representado por un muelle; mientras que la segunda, la variación de las dimensiones que se producen en el material a lo largo del tiempo, ya sea durante la aplicación del esfuerzo o bien después de cesar el mismo y está relacionado con las tensiones internas acumuladas en el material que se liberan gradualmente y se representa por un émbolo (Guillen et al., 2005).

El modelo de Maxwell se construye colocando en serie al muelle y el émbolo, y representa a un material que puede responder elásticamente a una tensión aplicada, pero también puede presentar posteriormente flujo viscoso (figura 12).

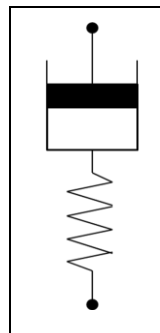


Figura 12. Modelo de Maxwell del comportamiento viscoelástico.

En las fibras naturales, se da por supuesto que el comportamiento esfuerzo-deformación unitaria es lineal hasta la ruptura; sin embargo, esta suposición no es realmente correcta; ciertamente, la inspección más cercana sobre el comportamiento mecánico de las fibras naturales sugiere un patrón de curvas de esfuerzo-deformación. La figura 13 muestra la curva típica de esfuerzo-deformación para fibras de coco; como se ve en ella, la sección lineal inicial en la curva de esfuerzo-deformación es seguida por otra sección lineal donde la tensión es desproporcionadamente más alta, mostrando una tendencia a la curvatura que indica la naturaleza viscoelástica de las fibras.

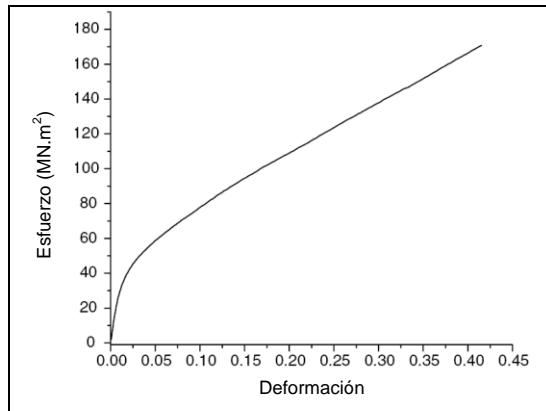


Figura 13. Curva típica de esfuerzo-deformación para fibras de coco.

Fuente: Tomczak et al. (2007a)

Resultados similares en el comportamiento mecánico a tensión para las fibras de Piassava pueden verse en la curva esfuerzo-deformación de la figura 14. En ella se ve una sección lineal inicial, siguiendo una región no lineal que tiende a formar una curva (Tomczak et al., 2007a).

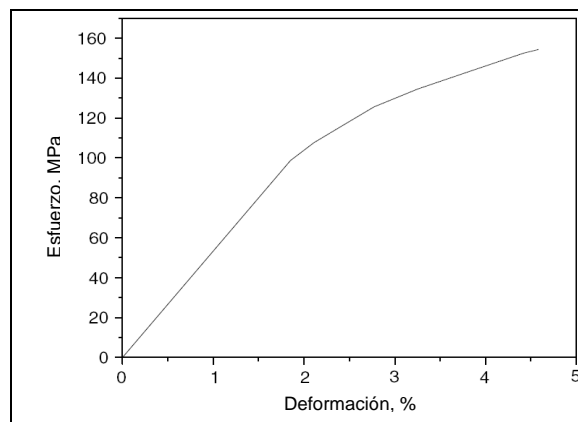


Figura 14. Curva típica de esfuerzo-deformación de fibras de Piassava.

Fuente: d'Almeida et al., (2005).

Comparativamente, ambas graficas son similares en la región elástica, presentando una relación lineal de esfuerzo-deformación unitaria, donde la pendiente inicial de cada una representa el módulo de elasticidad de la fibra. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos para las fibras de Agave Americana (Bessadok et al., 2007). Por otro lado, se han realizado ensayos en fibras de Curauá cambiando el esfuerzo de tensión en función del tiempo de 5 a 50 mm/min. Como se ve en la figura 15, esta variación incrementó la resistencia última a la tensión (RUT) de 178 a 217 MPa, sin que un cambio significativo ocurriera en el módulo de elasticidad y porcentaje de deformación (Tomczack et al., 2007b)

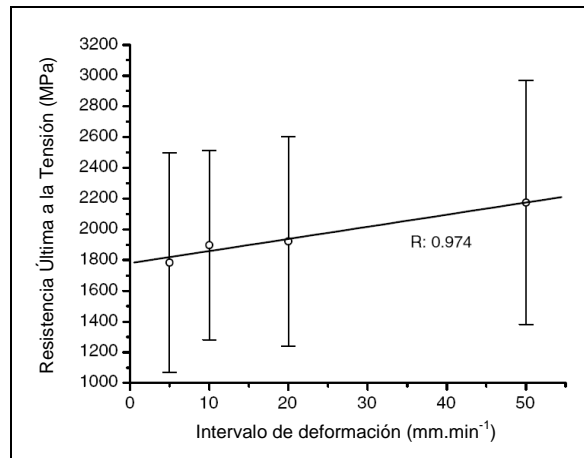


Figura 15. Influencia de la variación de la tensión por la velocidad en fibras de Carauá.

Fuente: Tomczack et al., (2007b).

Tomczack et al., (2007b, p. 6) explican este comportamiento en términos del modelo viscoelástico para fibras celulósicas como sigue: *“Fibras lignocelulosicas sujetas a ensayos mecánicos rápidos se comportan como un cuerpo elástico con la región cristalina absorbiendo la mayor parte de la esfuerzo/carga resultando en un aumento de la resistencia última a la tensión. Por otra parte, a bajas tasas de tensión se comportan como un líquido viscoso donde la carga es compartida en su mayor parte por la región amorfa de la fibra dando como resultado valores bajos de resistencia última a la tensión.”* Comportamiento similar fue observado en fibras de Sisal por Mukherjee et al., (1984), por lo tanto, realizar ensayos de tensión a distintas tasas de velocidad es un procedimiento útil para determinar el comportamiento viscoelástico de las fibras vegetales. En términos generales, se puede mencionar que en los materiales viscoelásticos, a medida que se incrementa la velocidad de aplicación de la carga, estos se fragilizan (Hernández-Gómez y Ruiz, 1993; Beltrán et al., 2004)

2.4. Factores que afectan las propiedades a tensión de las fibras

Comparados con los procedimientos de ensayo para materiales clásicos, la medición de las propiedades de productos como hilos o fibras que son comúnmente utilizados como componentes de refuerzo requiere de una forma particular de abordaje, pues la dependencia de un gran número de variables, como por ejemplo: la temperatura, humedad, el tiempo de prueba y la velocidad de deformación, o la poca uniformidad interior y exterior en la morfología complica la medición de las propiedades de la fibra, lo que plantea problemas adicionales durante la experimentación.

2.4.1. Influencia del diámetro

Teóricamente, en un ensayo de deformación uniaxial, la relación tensión-deformación es independiente de las dimensiones del espécimen por definición, en la práctica no es así para las fibras naturales, pues la medición del diámetro y la longitud refleja poca uniformidad en la morfología, como se muestra en la tabla 4, que presenta un comparativo de las características geométricas de algunas fibras vegetales.

Tabla 4. Propiedades físicas de algunas fibras vegetales.

Fibra	Longitud (cm)	Diámetro (μm)	Densidad lineal (tex)
Caña de azúcar	2.5-20	-	6.5-14
Kenaf	7-15	-	1.5-4.5
Ramie	20-140	-	0.19-1.98
Jute	40-100	-	0.51-0.71
Flax	150-360	16	1.4-3.0
<i>Agave tequilana</i> Weber	0.158	25.00	-
Henequén (Fibra de la Base de la Hoja)	-	51.00	-
Henequén (Fibra del Tronco)	-	35.00	-

Fuente: Iulius, O. (2004), Balam-Cocom et al., (2006).

En este caso, la variabilidad del diámetro influye en las propiedades mecánicas a tensión de fibra a fibra y a lo largo de una fibra. Tomczak et al., (2007a) realizaron ensayos de tensión con diferentes diámetros de fibra (figura 16) para evaluar su efecto en la resistencia última a la tensión y módulo de elasticidad reportando lo siguiente: con el incremento del diámetro de 0.040 mm a 0.40 mm, la resistencia última a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen de 275 MPa a 50 MPa y de 3.6 GPa a 1.2 GPa, respectivamente.

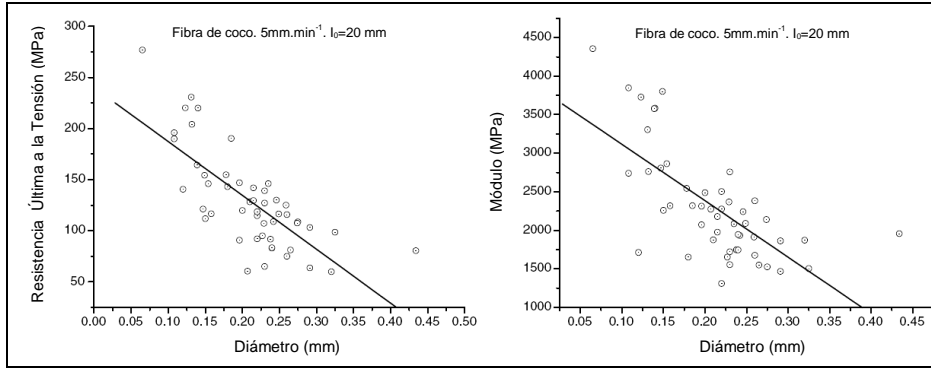


Figura 16. Influencia del diámetro en las propiedades mecánicas de la fibra de coco

Fuente: Tomczak et al., (2007a).

Por otro lado, Kulkarni et al., (1981) realizaron ensayos de tensión utilizando fibras de coco de origen Hindú con diferentes diámetros de fibra y su efecto en la resistencia última a la tensión fue el siguiente: con el incremento del diámetro de 0.10 a 0.45 mm, la resistencia última a la tensión incremento de 106.59 a 177.50 MPa. La diferencia en estos resultados se explica por la madurez de la fibra, condiciones de prueba y composición química, entre otros factores.

2.4.2. Influencia de la longitud

El efecto de la variación de la longitud en las propiedades mecánicas a tensión en fibras de Curauá se muestra en las gráficas de la figura 17. En estas gráficas se observa que la resistencia última a la tensión y el porcentaje de deformación a la rotura disminuyen de 223 a 173 MPa y de 10.20 a 3.74%, respectivamente, con aumentar la longitud. Por otra parte, el módulo de elasticidad presentó el comportamiento opuesto, aumentando de 26.6 a 52.9 GPa con el incremento en la longitud de 5 a 25 mm. Estos resultados son similares a los observados en el caso de fibras como piasava (d'Almeida et al., 2006).

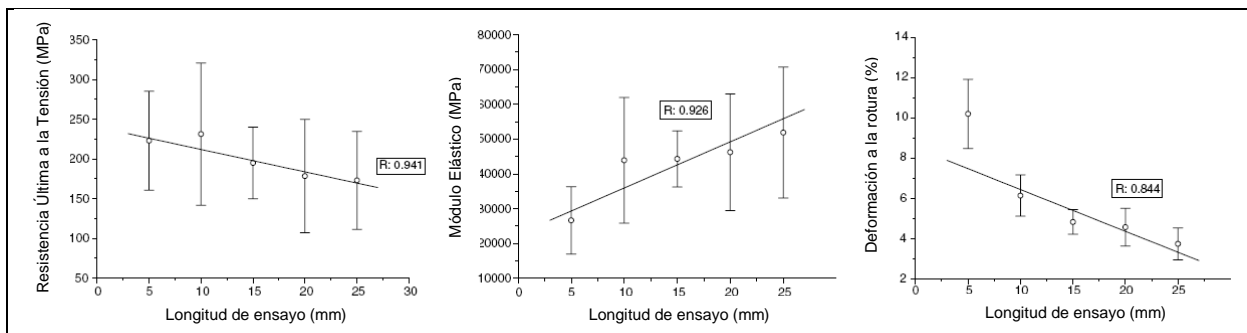


Figura 17. Influencia de la longitud en las propiedades mecánicas de la fibra de coco

Fuente: Tomczak et al., (2007a).

2.4.3. Forma de la sección transversal

En términos de la biología de la planta, una fibra es una celda individual caracterizada en su sección transversal por una forma de malacate, de longitud de hasta varios centímetros y pared de la célula bien desarrollada (Chernova et al., 2007). Una característica general de las fibras naturales es su diversidad, tomando distintas formas estructurales en su sección transversal, lo que es muy importante para muchas propiedades y aplicaciones. De las fibras sólidas, aquellas con sección transversal redonda ofrecen una alta resistencia al doblado y por lo tanto las fibras son rígidas. Por otra parte, las fibras con secciones transversales en forma de listón, como el algodón o la fibra de pasta de madera, ofrecen menor resistencia al doblado (Warner, 1995).

Las fibras de henequén estudiadas por Cauzarang-Martínez et al., (1991) muestran que la forma de la sección cambia a lo largo de la longitud de la fibra. En la base (figura 18a), se aprecia una forma renal; moviéndose hacia la sección mediana, cambia a una forma elíptica (figura 18b) y al final de fibra muestra una forma que se asemeja a un círculo (figura 18c). A diferencia de las fibras de henequén, las fibras de Flax y las fibras de Agave americana (Bessadok et al., 2007) presentan una forma poligonal con 5 o 7 lados.

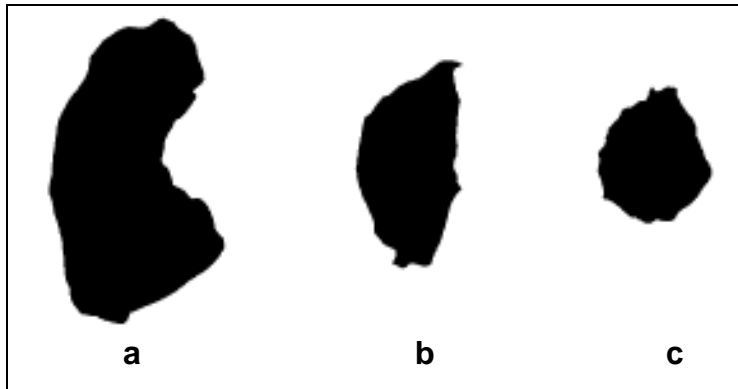


Figura 18. Sección transversal de la fibra de Henequén: a) renal; b) elíptica; c) círculo.

Fuente: Cauzarang-Martínez et al., (1991).

2.5. Propiedades mecánicas a tensión de las fibras vegetales

Las propiedades mecánicas a la tensión son las más importantes en las fibras, en particular de las fibras industriales, dado que son típicamente usadas en tensión o esfuerzos complejos que incluyen tensión. Por ejemplo, pueden necesitar una resistencia mínima cuando están sujetas a cargas, o pueden necesitar elongación mínima por extensiones impuestas (Warner, 1995).

Cuando se usan como refuerzo en un compuesto, su alta resistencia a la tensión y rigidez determinan la rigidez y la resistencia a la tensión del compuesto, mientras la matriz mantiene unidas las fibras, transmite las fuerzas de corte, y funciona como un recubrimiento (Riedel y Nickel, 2003).

La figura 19 muestra una pequeña sección de un compuesto reforzado con fibra, en el cual las fibras están alineadas en una dirección en la matriz. La dirección paralela a las fibras es la dirección "axial" y la dirección perpendicular a la fibra es la dirección transversal. Las propiedades del compuesto están bajo la dependencia de la orientación de la fibra y con esto responden en forma diferente a cargas compresivas que a cargas de tensión.

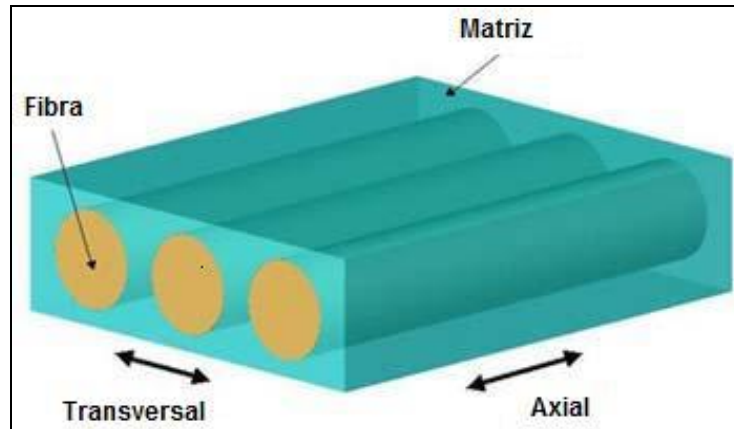


Figura 19. Esquema de un compuesto reforzado con fibra.

Por ejemplo, algunas fibras usadas como refuerzo para la elaboración de compuestos, como aramida y las fibras de carbón de muy alto módulo de elasticidad, son esencialmente más débiles en compresión que en tensión. Así un principio básico del diseño de compuestos es usualmente tener el modo de falla debido a la rotura a tensión de la fibra, con esto se aprovecha la firmeza alineando las fibras en direcciones donde la rigidez y la resistencia a la tensión son necesarias.

La tabla 5 compara las propiedades mecánicas de algunas fibras de carbón, vidrio, aramida y vegetales que son frecuentemente utilizadas como material de refuerzo para la elaboración de compuestos. La resistencia última a la tensión de las fibras de Curauá se ubica en el rango de 1250 a 3000 MPa y su módulo de elasticidad de 30 a 80 GPa, en contraste con las propiedades

de las fibras de la corteza del coco cuya resistencia última a la tensión es de 95 a 174 MPa y su módulo de elasticidad de 2.5 a 4.5 GPa (Satyanarayana et al., 2007).

Tabla 5. Valores promedios provistos de hojas técnicas de datos para fibras de aramida, carbón, vidrio y fibras vegetales.

Material	Tipo de fibra	Densidad (g/cc)	Diámetro (μm)	RUT (MPa)	ME (GPa)	Deformación (%)
Carbón	Bajo Costo	1.8	6–8	380	230	1.6
	Modulo estándar	1.8	6–8	3400–4800	220–240	1.5–2.2
	Módulo intermedio	1.8	5–6	3450–6200	290–300	1.3–2.0
	Alto módulo	1.8	5–8	3450–5500	340-450	0.7–1.0
Vidrio	E	2.54 –2.63	12–24	1400–3400	72–76	3–4.5
	E-CR	2.62	12-24	3300–3800	80–81	4.5–4.9
	S	2.48	12-24	3600–4500	86	5–5.7
Aramida	Kevlar 29	1.44	12	3600	83	4
	Kevlar 49	1.44	12	3600–4100	130	2.8
	Kevlar 149	1.47	12	3400	186	2
	Zylon AS	1.54	12	5800	180	3.5
	Zylon HM	1.56	12	5800	270	2.5
Natural	Flax	1.4-1.5	19	500–900	50–70	1.5–4
	Hemp	1.48	25	300–800	30–60	2–4
	Jute	1.3–1.5	20	200–500	20–55	2–3
	Fique	-	-	55.6	4.6	3
	Sisal	1.45	100-300	100–800	9–22	3–14
	Curauá	-	97	1250-3000	30-80	4.5-6
	Coco (Brasil)	-	40-400	95-174	2.5-4.5	13.7-41

Fuente: Kelly y Zweben (2000), Gañan y Mondragon, (2004) y Satyanarayana et al., (2007).

2.6. Sumario

Este capítulo presenta los conceptos de la resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria y aquellos fundamentos teóricos que explican el comportamiento mecánico de las fibras naturales en ensayos de tensión, a raíz de lo cual se explican los resultados de esta investigación y que permite comprender con suficiente aproximación la naturaleza de la variación de sus propiedades bajo distintas condiciones de prueba.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este apartado se presenta la metodología de investigación cuya base es la revisión de los trabajos previos que se han desarrollado en otras fibras de origen vegetal, en donde se ofrece un panorama de las variables para cada ensayo y métodos de experimentación para la aplicación del diseño adecuado y la obtención de la mayor cantidad de información con el menor número de ensayos posibles.

3.1. Metodología

Uno de los objetivos de este trabajo fue evaluar la respuesta de las propiedades mecánicas por la variación de tres factores principales: 1) diámetro, 2) longitud y 3) velocidad de la variación de la deformación unitaria, cada uno de ellos divididos en tres niveles y 4) por el tipo de fibra, dividido en dos niveles. Para ello, las fibras fueron seleccionadas, recortadas a 10, 15 y 20 mm; se midió el diámetro aparente y se clasificó en los siguientes estratos: 0.20 a 0.39 mm, 0.40 a 0.59 mm y 0.60 a 0.79 mm de diámetro. Además se requería realizar ensayos a la velocidad de 1, 5 y 50 mm/min; por lo cual el método estadístico más adecuado para esta investigación resultó ser el estratificado.

Se rechazó el uso del muestreo sistemático ya que requiere que la población sea homogénea y, debido a que no existen antecedentes previos se desconoce si posee esta característica. Se descartó el sistema de muestreo aleatorio debido a que se tiene una amplia variación de los diámetros y se formarían muchos estratos que contendrían un número muy bajo de elementos. El sistema de muestreo por conglomerados no se considera apropiado para esta investigación porque sus elementos requerían ser elegidos aleatoriamente.

Para poder realizar los experimentos descritos anteriormente se desarrolló una metodología (figura 20). Esta consistente en ocho etapas que inicia con la colecta de bagazo, preparación del bagazo, determinación del tamaño de muestra, extracción de las fibras, selección de unidades experimentales, caracterización física, realización de ensayos mecánicos a tensión y finaliza con el análisis estadístico de resultados y comparación de propiedades con otras fibras. Los pasos se enlistan y explican a continuación.

- **Colecta del bagazo.** Para este caso, se colectó la población de bagazo por el procedimiento descrito en la norma mexicana NMX-AA-015-1985, la cual determina un tamaño de 10 kg para los análisis físicos, químicos y biológicos.
- **Preparación del bagazo.** La población de 10 kg de bagazo se extendió sobre una superficie plana a la sombra para secarse de forma natural por un periodo de 3 meses.
- **Determinación del tamaño de muestra.** Se calculó una muestra de 370 g de fibra en base a un muestreo aleatorio simple.

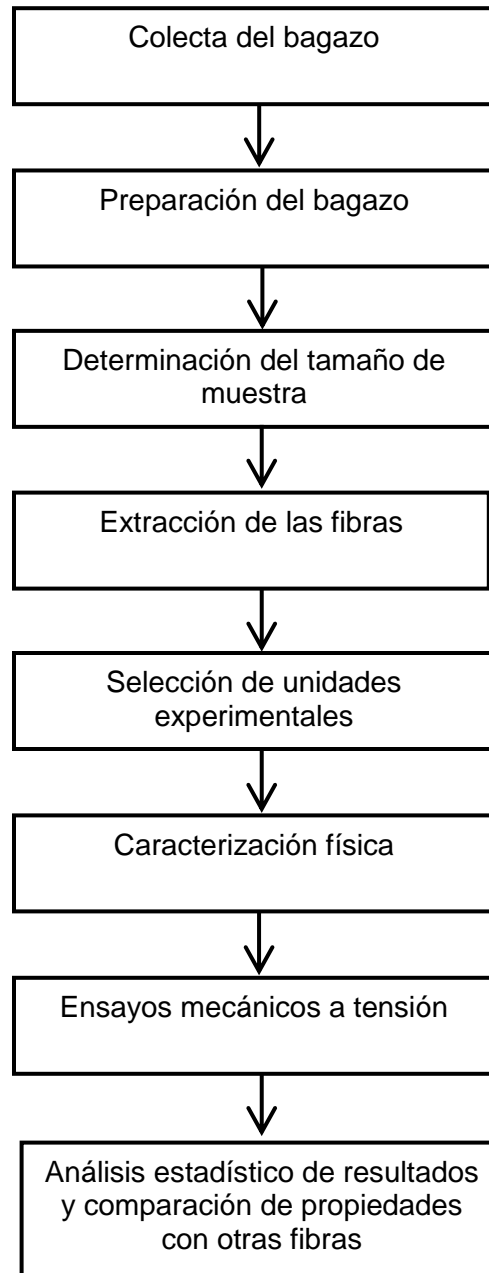


Figura 20. Diagrama de la metodología.

- **Extracción de las fibras.** La fibra fue obtenida manualmente, se lavo utilizando el proceso de enriado y se preparo para la selección de unidades experimentales (Morali y Mohana, 2005).
- **Selección de unidades experimentales.** Se extrajo de forma aleatoria una muestra de 1000 fibras, las cuales fueron medidas en su longitud.
- **Caracterización física.** En esta etapa se utilizaron técnicas de microscopia óptica que han sido empleadas para medir fibras individuales de Flax (Baley, 2004), bagazo de la

caña de azúcar (El-Tayeb, 2009) y fibras de "*Rhectophyllum camerunense*" (Béakou et al., 2008). En primer lugar, se eligieron fibras individuales al azar y que se montaron en una tarjeta de papel aperturada, la cual se colocó sobre la platina del microscopio óptico para mejorar la visualización, tomar imágenes de la sección longitudinal y medir el diámetro aparente. En segundo lugar, se tomaron muestras de fibras de tres diámetros y se realizaron cortes para conseguir probetas de la sección transversal que se midieron para tener el área promedio y determinar la forma de la sección transversal.

- **Ensayos mecánicos a tensión.** Los ensayos a los que se sometió la fibra están basados en lo que indica la norma NMX-A-069-1990 ya que el tipo de probeta y prueba están contemplados en los materiales y procedimientos del método.
- **Análisis estadístico de resultados y comparación de propiedades con otras fibras.** Finalmente se aplicaron las medidas de tendencia central y de dispersión, y se realizó un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) para evaluar el comportamiento de las propiedades y compararlas con otras fibras de origen vegetal.

3.2. Equipos e instrumentos de medición

3.2.1. Microscopio óptico.

El microscopio, de *micro* (pequeño) y *scopio* (observar), es un instrumento que permite mirar objetos que son demasiado pequeños para ser vistos a simple vista. El tipo más común es el microscopio óptico. Se trata de un instrumento que contiene una o varias lentes que permiten obtener una imagen aumentada del objeto y que funciona por refracción. El modelo del microscopio que se utilizó es Axiolab de la marca Carl Zeiss (figura 21).

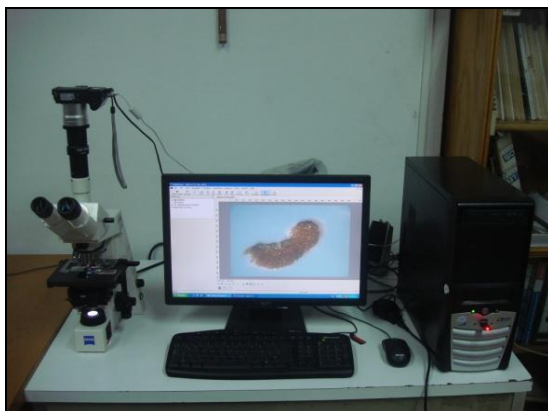


Figura 21. Microscopio óptico y cámara fotográfica.

Para capturar las imágenes y poder manipularlas se utilizó una cámara digital Canon PowerShot A640, de 10.0 megapixel, conexión con puerto USB 2.0 para la computadora, salida de audio y video para televisión y los siguientes programas para manipular imágenes PhotoStitch, RemoteCapture y ZoomBrowser EX. En lo que respecta al programa AxioVision LE, para realizar las mediciones de las fibras, sus características son las siguientes: medidas interactivas de longitud, contorno, ángulos y áreas; escalas geométricas, procesamiento y optimización de imágenes, elaboración de reportes y exportar e importar imágenes en cualquiera de los formatos BMP, GIF, JPG, JPG2000, TIFF y ZVI.

3.2.2. Máquina universal para prueba de materiales

Los equipos de pruebas para el ensayo de materiales permiten utilizar los modos de ensayo de tensión y de compresión en un solo bastidor. Además, algunos pueden realizar ensayos de carga reversible. Entre los tipos de ensayo realizados por estos equipos se encuentran los siguientes: tensión, compresión, cizalladura, flexión, pelado, desgarramiento y ductilidad a la flexión para materiales como metales finos, dispositivos biomédicos, caucho, hilos, espuma, alimentos, plásticos, papel, adhesivos, materiales compuestos, entre otros.

El equipo de pruebas marca Instron modelo 4442 permite medir la resistencia máxima de un material sujeto a una carga de tensión, el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal, normalmente expresado en mm, el gráfico del esfuerzo como una función de la deformación medidas simultáneamente (tabla 6).

Tabla 6. Características de la máquina universal Instron 4442.

Característica	Rango
Capacidad de carga	500 N
Velocidad de la cruceta	0.1 a 1000 mm/min
Tipo de Materiales	Plásticos, productos vegetales, papel, alimentos, textiles
Celda de carga	500 N
Tipos de ensayos	Compresión, tensión, corte, flexión, penetración

Los ensayos de resistencia a la tensión se realizaron en el Laboratorio de Alimentos del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca. La máquina universal para prueba de materiales se muestra en la figura 22.



Figura 22. Máquina universal de pruebas Instron 4442.

3.3. Adquisición de datos

Los resultados de los experimentos de tensión mostrados en la pantalla del cuadro de control de la máquina universal de pruebas fueron filmados con una cámara Cybershot DSC-N2 (Sony Corp., Tokyo, Japon) equipada con un Zoom óptico Carl Zeiss de 3x (figura 23). Posteriormente, los videos fueron transferidos a una computadora portátil marca Toshiba para realizar la captura de datos y su posterior concentración en una hoja de Excel.



Figura 23. Texturómetro Instron modelo 4442 y cámara fotográfica.

Para construir de la gráfica típica esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a cada uno de los experimentos se siguió el método descrito por López Amo y Pons, (1981) en donde se tomaron como puntos de referencia el esfuerzo medio correspondiente a 20 ensayos para cada una de su deformación unitaria de 0.025, 0.050, 0.10, 0.20 y 0.30.

3.4. Consideraciones experimentales

- La elección de la fuente de la materia prima se realizó en atención dos criterios: por la importancia de los distrito de la región del mezcal en el estado y para el aseguramiento del estudio de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw. Como resultado se eligió la fábrica de Mezcal “Barroco” de San Juan Guelavia, población perteneciente al distrito de Tlacolula que es el más dedicado al cultivo y aprovechamiento del *Agave angustifolia* Haw y cuyo proceso es supervisado y certificado por el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal A.C (COMERCAM A. C.) con base en las especificaciones de la norma oficial mexicana NOM-070-SCFI-1994, que especifica en el inciso 6.2 el requerimiento de la madurez apropiada de la planta y el registro de la plantación para la acreditación del producto.
- En cuanto a la elección del laboratorio donde se realizaron los ensayos se tomo en cuenta la cercanía y disponibilidad del equipo para realizar las comprobaciones que fuesen necesarias a los resultados iniciales y de las tres alternativas consideradas inicialmente, se opto por realizar la experimentación con el Texturómetro Instron 4442 para ensayos universales de materiales biológicos que se encuentra en el Laboratorio de Alimentos del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- Para el análisis de microscopia óptica, la captura de imágenes se realizó en horario nocturno con el propósito de reducir la influencia de la luz ambiental sobre la visión de las probetas y la calidad de las tomas con la cámara fotográfica.
- En atención a la determinación de las condiciones de ensayo, por no existir trabajos similares realizados con fibras del bagazo de *Agave angustifolia* Haw la elección de los diámetros, longitudes y velocidades de este estudio no siguió un patrón de condiciones iniciales, con el propósito de conocer el cambio en las respuestas de cada tratamiento.

3.5. Descripción de la gama donde se tomaron las muestras

Las fibras del *Agave angustifolia* Haw se extraen de las hojas y del bagazo de la piña, este último conformado por el tallo y la base de las hojas. Se analizará la resistencia a la tensión de las fibras extraídas del bagazo de la base de las hojas debido a que son los restos más fibrosos. Esta parte está constituida por manojos de fibra de 50 a 200 mm de longitud adheridas por residuos sólidos con 71% de humedad.

3.6. Tiempo de cosecha

La cosecha del agave se realizó en el mes de junio del año 2008, que corresponde a los meses finales de la época de sequía. Entre los productores de mezcal, esta época se caracteriza por ser la más favorable para la cosecha debido a la mejora del rendimiento del agave para la producción del destilado.

3.7. Época del año en que se realizó el análisis

Los ensayos de tensión y el análisis de resultados se realizaron en el bimestre junio-julio del año 2009, que corresponden a los meses transitorios de la época de secas a la de lluvias.

3.8. Sumario

Este tercer capítulo muestra la metodología de investigación planteada en base a los fundamentos teóricos de la mecánica de los materiales biológicos así como procedimientos experimentales utilizados en la caracterización física de otras fibras vegetales para determinar las principales propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, como la resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria.



CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo de las actividades llevadas a cabo en cada etapa de la metodología propuesta, desde la colecta de bagazo hasta la realización de los ensayos de tensión, se presenta en esta sección.

4.1. Colecta de bagazo residual

En esta primer parte de la metodología, se realizaron 3 actividades, las cuales se describen a continuación:

- **Determinación del peso volumétrico.** Se utilizó la Norma Mexicana de Protección al Ambiente en materia de Residuos Sólidos NMX-AA-019-1985, que marca el uso de un tambo metálico con capacidad de 200 l. Para aplicar esta norma se pesó el recipiente vacío, tomando este peso como tara del mismo. El recipiente se llenó con el bagazo y finalmente se obtuvo el peso del bagazo por diferencia, entre la tara y el peso del recipiente con los desechos sólidos; calculándose después el peso volumétrico del bagazo.
- **Obtención de bagazo residual.** Según la Norma Mexicana NMX-AA-015-1985, se establece el método de cuarteo para la obtención de una población de 10 kg de bagazo para los análisis en el laboratorio. Para aplicar este método se procedió de la siguiente forma: el universo de bagazo dispersado en el área de desecho se acumuló en forma de un montículo, se dividió en cuatro partes iguales, denominadas sectores A, B, C y D, se separaron los sectores A y C y con los sectores B y D se repitió la homogenización y los cuarteos, hasta obtener 10 kg de bagazo (figura 24). Además, de este bagazo se tomaron 2 muestras de 15 g de la parte central del estrato superior, medio e inferior del montículo para determinar el contenido inicial de humedad utilizando el método de la estufa de secado a 95° C (Calvo y de Morales, 1988), depositándose en bolsas de polietileno para su traslado al sitio de almacenamiento



Figura 24. Cuarteo del montículo de bagazo.

- **Preparación preliminar del bagazo.** El bagazo obtenido se colocó sobre una superficie plana a la sombra (figura 25) por un periodo de 3 meses y se realizaron remociones periódicas para reducir el contenido de humedad con el que provenía de la fábrica de mezcal. Una vez transcurrido este periodo, se depositó en un recipiente de plástico, en el cual se resguardó de la contaminación medioambiental, humedad y el ataque de plagas e insectos y se determinó el contenido de humedad utilizando el método de la estufa de secado a 95° C (Calvo y de Morales, 1988).



Figura 25. Secado natural de bagazo.

4.2. Determinación del tamaño de la muestra

El criterio que se consideró para la determinación del tamaño de muestra de fibras de una población de bagazo fue de manera aleatoria simple. El tamaño de la población de bagazo es de 10000 g y el gramaje de la muestra se obtuvo utilizando la ecuación siguiente:

$$n = \frac{Z^2 pqN}{NE^2 + Z^2 pq} \quad (4)$$

donde: n = es el tamaño de la muestra;
 Z = es el nivel de confianza;
 p = es la variabilidad positiva;
 q = es la variabilidad negativa;
 N = es el tamaño de la población;
 E = es la precisión o el error

Para calcular el tamaño de una muestra se tomaron en cuenta tres factores:

1. El porcentaje de confianza con el cual se quiere generalizar los datos desde la muestra hacia la población total.
2. El porcentaje de error que se pretende aceptar al momento de hacer la generalización.
3. El nivel de variabilidad que se calcula para comprobar la hipótesis.

Se consideró una confianza del 95%, un porcentaje de error del 5% y la máxima variabilidad por no existir antecedentes sobre la investigación y porque no se puede aplicar una prueba previa. Los valores utilizados para este estudio fueron los siguientes:

$$Z=1.96$$

$$E = 5 \%$$

$$N = 10000 \text{ g}$$

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 4, se obtiene el número de muestra de fibras individuales.

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)(10000)}{(10000)(0.05)^2 + (1.96)^2(0.5)(0.5)} = 369 \text{ g}$$

El valor obtenido se redondeó al valor cercano superior, con lo cual se obtuvo un tamaño de muestra de 370 g de fibra.

4.3. Extracción de las fibras del bagazo y selección de unidades experimentales

Las fibras se obtuvieron manualmente separando las fibras de la médula que las mantenía adheridas de haces que se obtuvieron de manera aleatoria de la parte inferior, media y superior del recipiente de plástico que contenía el bagazo, como se observa en la figura 26.



Figura 26. Obtención de fibras del bagazo del agave.

En el caso de las fibras extraídas de las pencas en estado verde, el procedimiento de extracción consistió en cuatro etapas principales: 1) las pencas en estado verde se dejaron en una primera maceración en agua corriente por 20 días, 2) después se sometieron a compresión con una carga de 15 toneladas, 3) se efectuó una segunda maceración por 10 días y 4) se realizó la separación manual de las fibras adheridas entre sí por la materia sólida.

Una vez concluida la etapa de lavado, ambos tipos de fibras se mantuvieron en reposo sobre una superficie plana a la sombra por 4 días a 23 ± 1 °C y 38 ± 2 % de humedad en el medio ambiente (figura 27) y posteriormente, se determinó el contenido de humedad en las muestras. Este análisis se llevó a cabo por triplicado utilizando el método de la estufa de secado a 95° C (Calvo y de Morales, 1988).



Figura 27. Secado de fibras.

A partir del tamaño de muestra se procedió a la selección de las unidades experimentales (Infante Gil y Zarate de Lara, 1990, Montgomery, 1970) en base a criterios de experimentaciones previas y cuidando que las fibras estuvieran libres de defectos como rotura, doblez, ramificación o quemado por fuego. Para ello se eligieron al azar 1000 fibras considerando que es un número representativo del tamaño de muestra determinado. Estas fibras se depositaron en envolturas individuales y se le asignó un número de clasificación consecutivo.

4.4. Caracterización física

4.4.1. Longitud

La longitud inicial de cada una de las fibras de la unidad experimental de 1000 unidades se obtuvo usando una regla metálica flexible marca Mitutoyo con un rango de 0 a 1000 mm y una graduación de 0.5 mm. Para llevar a cabo la medición la regla se colocó sobre una mesa de trabajo y se sujetó el extremo de la fibra en el punto 0 de la regla. Luego se deslizó la fibra sobre la regla hasta registrar la medida en el otro extremo, como se muestra en la figura 28. Las longitudes seleccionadas para el ensayo de fibras según la revisión bibliográfica expuesta en la página 22 del capítulo 2, fueron de 10 mm, 15 mm y 20 mm, sumándole 50 mm para sujetarla en ambos extremos con las mordazas de cara plana.

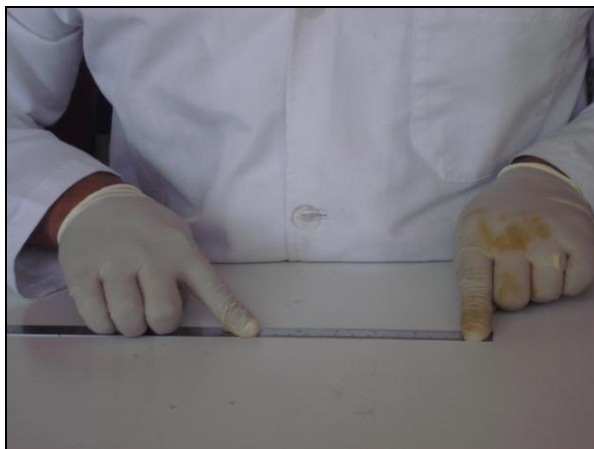


Figura 28. Medición de la longitud.

4.4.2. Diámetro aparente

El diámetro aparente de las fibras se obtuvo usando un microscopio óptico marca Axiolab con un lente de aumento 10x, como se muestra en la figura 29. El procedimiento experimental para medir el diámetro aparente fue el siguiente:

Esta etapa inicio realizando un muestreo aleatorio para obtener fibras individuales, posteriormente la fibra se montó sobre una tarjeta de papel aperturada y se sujetó con cinta adhesiva, después se colocó la tarjeta sobre en un portaobjetos de vidrio, procurando ubicarla de manera horizontal y se observó en el microscopio. Se activó el programa de computo Axiovision LE, se adquirió la imagen, se eligió la escala de medición que corresponde al número de objetivo con el cual se obtuvo la imagen y se realizó la medición del diámetro aparente en la sección longitudinal de la fibra mediante la función “Length” que se ubica en el menú “Dimensions”. A cada fibra se le realizaron 10 mediciones en su longitud de ensayo. La clasificación se realizó agrupando las probetas en tres intervalos: 0.20 a 0.39 mm, 0.40 mm a 0.59 mm y 0.60 mm a 0.79 mm. Los valores fueron obtenidos en milímetros cuadrados, estos resultados se presentan la página 47 del capítulo 5.

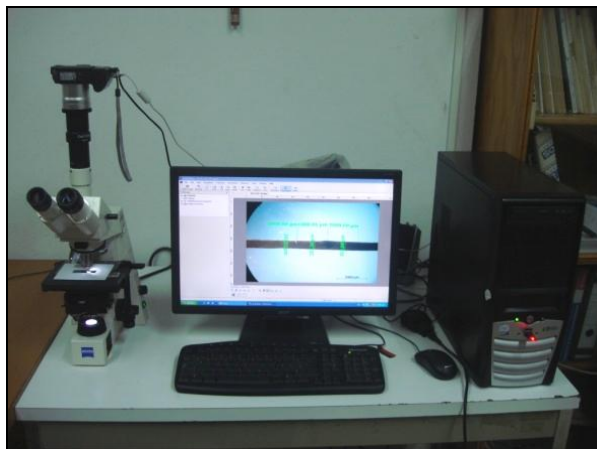


Figura 29. Medición del diámetro aparente.

4.4.3. Forma y área de la sección transversal

Se seleccionó aleatoriamente una fibra por cada diámetro, obteniendo un grupo de tres unidades. Cada una de ellas se dividió en 10 secciones y de cada sección se extrajo una probeta de 1 a 0.5 mm de espesor. Registrando una muestra total de 30 elementos. El procedimiento que se siguió para medir el área de la sección transversal fue el siguiente:

El corte de probetas se realizó perpendicular al eje de la fibra para que la superficie del área sea plana, utilizando un bisturí con una hoja recta del no. 25. Después se colocó la probeta en un portaobjetos de vidrio, procurando que las probetas se ubicaran de manera vertical para poder enfocarla correctamente en el microscopio. Enseguida se situó el portaobjetos en la

platina del microscopio para sujetarlo y se observó la muestra. Para medir se activó el programa de computo Axiovision LE, se adquirió la imagen, se eligió la escala de medición que corresponde al número de objetivo con el cual se adquirió la imagen y se realizó la medición del área en la sección transversal de la fibra mediante la función “Area” que se ubica en el menú “Dimensions”. Los valores fueron obtenidos en milímetros cuadrados y los resultados se presentan en las páginas 49, 50 y 51 del capítulo 5.

4.5. Ensayos de tensión

4.5.1. Diseño de experimentos

Se utilizaron tres diseños de experimentos, los cuales relacionan tres variables independientes con las dependientes: resistencia última a la tensión (RUT), módulo de elasticidad (ME) y deformación unitaria (DU). La primera variable independiente es el diámetro aparente (D) con tres niveles D_1 , D_2 y D_3 ; la segunda es la longitud (L) con tres niveles L_1 , L_2 y L_3 , y la tercera variable es la velocidad de desplazamiento de la mordaza de sujeción (V), con tres niveles V_1 , V_2 y V_3 . La tabla 7 presenta la organización de los tratamientos.

Tabla 7. Diseño experimental.

	D_1			D_2			D_3			
	L_1	L_2	L_3	L_1	L_2	L_3	L_1	L_2	L_3	
TRATAMIENTO 1										V_1
	X			X			X			V_2
										V_3
TRATAMIENTO 2										V_1
	X	X	X							V_2
										V_3
TRATAMIENTO 3							X			V_1
							X			V_2
							X			V_3

Un cuarto tratamiento se realizó para comparar las propiedades mecánicas de las fibras del bagazo con fibras testigo obtenidas de las pencas del agave en estado verde. La tabla 8 presenta los valores de los diámetros, longitudes y velocidades seleccionadas.

Tratamiento 1. Se siguió un diseño unifactorial para evaluar el efecto del diámetro sobre la resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria a la rotura. El

tratamiento consistió en dividir el diámetro en tres rangos: 0.20 a 0.39 mm, 0.40 a 0.59 mm y 0.60 a 0.79 mm; ajustando la velocidad de ensayo a $v_2 = 5$ mm/min, y longitud de 10 mm.

Tratamiento 2. Posteriormente se evaluó el efecto de la longitud con las variables independientes, siguiendo un diseño unifactorial. La finalidad fue conocer la variación de la resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria a la rotura con tres longitudes, para ello se ajustó la velocidad de la ensayo a $v_2 = 5$ mm/min y se utilizó el diámetro D_1 . Las longitudes de ensayo se establecieron con base a la revisión bibliográfica sobre estudios realizados en otras fibras de origen vegetal de la página 22.

Tratamiento 3. Se determinó el efecto de la velocidad, siguiendo un diseño unifactorial que consistió en la variación de la velocidad de ensayo de 1, 5 y 50 mm/min, manteniendo constante la longitud de fibra ($L_1 = 10$ mm) y el diámetro (D_3). Las velocidades se establecieron con base a una revisión bibliográfica de estudios realizados en otras fibras de origen vegetal y fibras obtenidas de las hojas del *Agave angustifolia* Haw de la página 20 del marco teórico.

Tabla 8. Variables de ensayo seleccionadas

Designación	Valor
D_1	0.20-0.39 mm
D_2	0.40-0.59 mm
D_3	0.60-0.79 mm
L_1	10 mm
L_2	15 mm
L_3	20 mm
v_1	1 mm/min
v_2	5 mm/min
v_3	50 mm/min

Tratamiento 4. Finalmente, se realizaron ensayos de resistencia a la tensión para comparar las propiedades de dos tipos de fibra, siguiendo un diseño aleatorizado por bloques completos utilizando dos niveles: fibra testigo (FT) y fibra de bagazo (FB) y, manteniendo constante la velocidad, longitud y diámetro.

4.5.2. Determinación del número de probetas

Los tipos de muestreo probabilístico más utilizados son: aleatorio simple, aleatorio sistemático, aleatorio estratificado y aleatorio por conglomerados (Montgomery y Runger, 2008). Desde el enfoque probabilístico, la variabilidad de las propiedades del material son estimadas con base estadística el cual tiene la ventaja de ser consistente.

Otros criterios para seleccionar el número de probetas son los siguientes: en primer lugar, son los trabajos previos que se han desarrollado sobre el tema, en donde se ofrecen un panorama del tamaño de elementos utilizados para cada ensayo; en segundo lugar, la normatividad referente al tipo de prueba que se va a realizar, en la cual ya se tiene estipulado un número necesario de elementos para llevar a cabo las pruebas de tensión. Otros criterios importantes a considerar que también determinan qué tan grande o pequeño puede ser el número de probetas son: la cantidad de material para realizar las pruebas, la disponibilidad de los equipos e instrumentos para llevar a cabo la experimentación, el costo de cada uno de los ensayos y el tiempo necesario para desarrollar cada una de las actividades experimentales.

Para esta investigación se optó por seguir el camino del muestreo estratificado, que consistió en dividir a la población en subgrupos o estratos que tienen como característica común el diámetro y en función de tres longitudes establecidas a raíz de una revisión bibliográfica. Los criterios que se utilizaron para determinar el número de probetas son:

- En la literatura revisada no existen artículos científicos que hayan determinado las propiedades físicas ó mecánicas de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, sin embargo, hay algunos trabajos que describen el comportamiento mecánico a tensión de fibras extraídas de otras variedades de agave o del bagazo de caña de azúcar en donde han seleccionado de manera aleatoria las unidades experimentales para realizar las pruebas.
- Otro criterio que se utilizó para definir el número de fibras que se debían ensayar por cada tratamiento, fue con base a la norma: NMX-A-069-1990, que se enfoca a la determinación de la carga de ruptura, tenacidad y alargamiento por el método de hilo individual. El inciso 5.3 de la norma, menciona el procedimiento para la toma de muestras y ensayo de hilos de acuerdo a lo siguiente: De cada paquete se toman varios especímenes a intervalos de 20 metros cada uno de acuerdo al cuadro de la tabla 9.

Tabla 9. Determinación del tamaño de muestra por la norma NMX-069-1990.

Hilos	Carga a la ruptura	Tenacidad	Alargamiento
Filamentos continuos	10	10	10
Fibras cortas	20	20	20

Como se observa en la tabla, la norma NMX-A-069-1990, recomienda un número de veinte especímenes por ensayo para determinar la carga a la ruptura, tenacidad y alargamiento.

4.5.3. Procedimiento experimental

El procedimiento que se siguió para realizar los ensayos de tensión en fibras individuales con la máquina universal de pruebas Instron 4442 (Las características de estas mordazas se presentan en el anexo 1) fue el siguiente:

En primer lugar, se inicio con la calibración y balanceo de la carga, este ajuste se realiza de manera automática por el equipo de ensayos una vez montadas las mordazas de sujeción con tornillo de acción lateral serie 2710-004, mediante los pasos siguientes:

- a. Ubicarse en la sección principal del cuadro de mandos, correspondiente a la carga.
- b. Oprimir la tecla **CAL**.
- c. Oprimir la tecla **INTRODUCIR** para registrar en el sistema y esperar hasta que los valores dejen de parpadear en la pantalla numérica
- d. Oprimir la tecla **BAL**.
- e. Oprimir la tecla **INTRODUCIR** para registrar en el sistema y esperar hasta que los valores dejen de parpadear en la pantalla numérica.

Posteriormente se efectuó el ajuste de la longitud de ensayo con el botón de control del mando de aproximación para subir y bajar la mordaza superior. Auxiliándose de un calibrador vernier se midió la distancia entre las mordazas. Una vez que se alcanzó la distancia requerida se registra en el tablero de control oprimiendo la tecla **RESET D.I.** con lo cual queda predeterminada. Después se montó la probeta, se verificó la alineación (figura 30a) y se cerraron las mordazas manualmente con un apriete medio (figura 30b). La prueba se inició al oprimir la tecla con la flecha hacia arriba de la sección de mandos para el ensayo en el cuadro de mandos.

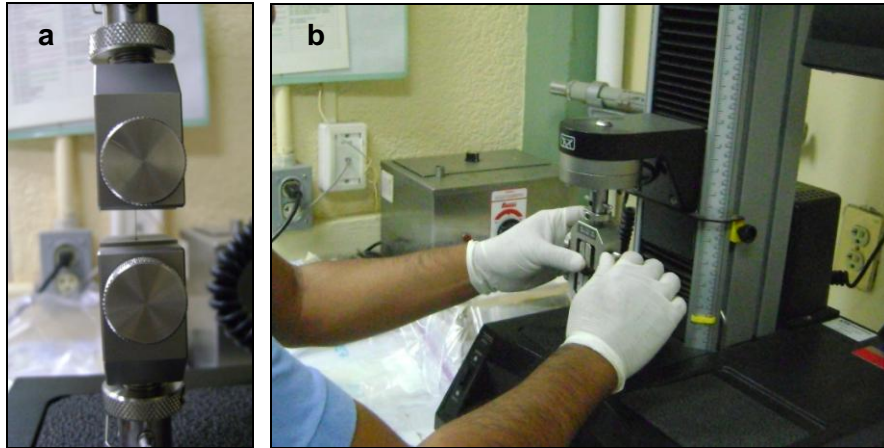


Figura 30. a) Alineación de las fibras individuales; b) Apriete de las mordazas.

Durante el ensayo los resultados típicos son presentados en las pantallas de carga y extensión (figura 31a) en unidades del Sistema Internacional, kilonewtons (kN) y milímetros (mm), respectivamente, y se videograbaron usando una cámara digital con el procedimiento que se describe en la pagina 32. La prueba concluye cuando se rompe la fibra (figura 31b) y se registra un valor 0 en la pantalla de carga.



Figura 31. a) presentación de los resultados del ensayo; b) rotura de fibras individuales.

4.6. Análisis de resultados

Se realizó un análisis de varianza para generar los resultados y conclusiones del trabajo con los valores obtenidos en cada uno de los ensayos, ya que en este caso particular, los experimentos tuvieron un solo factor de interés los cuales fueron: diámetro, longitud, velocidad y tipo de fibra. A continuación se describe los parámetros más importantes de este análisis.

Análisis de varianza de un solo factor

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. Se trata, por tanto, de una generalización de la Prueba T para dos muestras independientes al caso de diseños con más de dos muestras. La hipótesis que se pone a prueba en el ANOVA de un factor es que las medias poblacionales son iguales. Si las medias poblacionales son iguales, lo que significa que los grupos no difieren en la variable dependiente y que, en consecuencia, la variable independiente no es factor de la variable dependiente. Para el análisis de varianza se emplea la prueba F para probar la hipótesis nula, la cual afirma la igualdad entre las medias poblacionales o las de tratamiento. Entonces la hipótesis nula es:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_l \tag{5}$$

contra:

$$H_a : \text{al menos dos } \mu_i \text{ son diferentes} \tag{6}$$

donde: μ_1 = media de la población 1 o respuesta promedio del tratamiento 1

·
·

μ_l = media de la población l o respuesta promedio del tratamiento l

l = número de poblaciones o tratamientos en comparación

La hipótesis nula, H_0 , es verdadera, entonces las observaciones de cada muestra tienen como origen una distribución normal con la misma media, μ . Por lo tanto, las medias muestrales deben ser similares. El estadístico de prueba está fundamentado en comparar la variación entre muestras con una medida de variación calculada a partir de cada una de ellas. El estadístico de prueba para ANOVA de un solo factor se define por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{MSTr}{MSE} \tag{7}$$

donde: MSTr = Cuadrado medio de tratamientos

MSE = Cuadrado medio del error

Prueba F

Teorema: Sea F el estadístico de prueba de un análisis de varianza de un solo factor, con “l” poblaciones o tratamientos y una muestra aleatoria de “n” observaciones. Si H_0 es verdadera, entonces F tiene una distribución F con l-1 grados de libertad en el numerador y l(n-1) grados de libertad en el denominador. Si f representa el valor calculado de F, la región de rechazo $f \geq F_{\alpha, l-1, l(n-1)}$ especifica una prueba con nivel de significancia α .

P-value

Es una forma alterna de reportar los resultados de una prueba estadística de hipótesis. La forma tradicional de hacerlo es afirmar que la hipótesis nula sea rechazada o no, a un nivel de significancia α . El P-value es la probabilidad de que el estadístico de prueba tome un valor mayor o igual al valor observado de la estadística (valor obtenido de tablas estadísticas) cuando la hipótesis nula es verdadera. Es decir, el P-value es el menor nivel de significancia con el que se puede rechazar la hipótesis nula.

Es por esto que se puede considerar que el P-value ofrece información acerca del peso de la evidencia en contra de la hipótesis nula, y como resultado un investigador puede elaborar una conclusión a cualquier valor específico de significancia; es decir, con distintos valores de α . En otras palabras, el P-value le permite al investigador determinar por si mismo que tan significativa es la información sin un análisis de datos donde se imponga un nivel de significancia preestablecido o seleccionado. El P-value es la evidencia de la hipótesis nula, si es pequeño debe rechazarse; en caso contrario (que sea grande con respecto al valor de α) se tiene que aceptar la hipótesis nula. El nivel de significancia frecuentemente utilizado es de 0.05, es decir, cuando $Pvalue < 0.05$, se produce el rechazo de la hipótesis nula, lo que implica que existe diferencia significativa en al menos una media de los tres tratamientos.

4.7. Sumario

En este capítulo se describió cada una de las etapas que se realizaron en el desarrollo experimental, con base en los fundamentos de la normativa correspondiente y los antecedentes teóricos de algunos trabajos que han determinado el comportamiento mecánico en otras fibras vegetales, cuya información se presentó en el capítulo II. Asimismo, se describieron las características de los instrumentos y equipos de medición que se emplearon. Esta metodología fue apropiada y con ella se alcanzaron los resultados que se exponen en el siguiente apartado.



CAPÍTULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS

En esta parte se muestran los resultados de las actividades del desarrollo experimental, iniciando con la descripción de la colecta de bagazo, el proceso de extracción de fibra, la medición de la forma y área de la sección transversal y el diámetro aparente, finalizando con los resultados obtenidos de los ensayos de tensión.

5.1. Caracterización física

5.1.1. Longitud

En las mediciones de 1000 fibras se encontró que la longitud mínima fue de 5.5 cm, longitud máxima de 225 mm y longitud media de 135 mm. Las fibras de bagazo con la mayor longitud se ubican en el rango de 222 a 230 mm; por su parte, las fibras más cortas de 60 a 67 mm; la longitud con la mayor frecuencia en esta muestra se encuentra entre 137 y 154 mm. La desviación estándar fue de 2.96. El cuadro estadístico de datos se presenta en el anexo 2. En la figura 32 se presenta el histograma de la distribución de frecuencias de la longitud promedio de las fibras extraídas del bagazo, el rango se ubica entre 50 y 230 mm con 15 intervalos. La distribución es del tipo normal y su porcentaje de error calculado es de 0.001519.

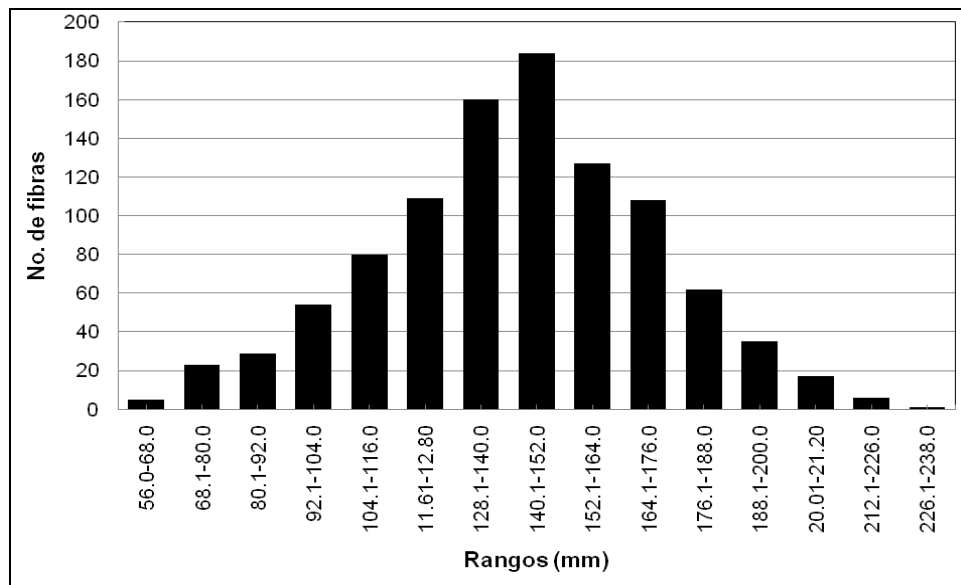


Figura 32. Histograma de longitudes.

5.1.2. Diámetro aparente

El diámetro aparente de la sección efectiva de prueba (10, 15 y 20 mm) de 180 fibras de bagazo fue medido con las imágenes obtenidas a través del microscopio óptico, realizando diez lecturas con la herramienta Length del programa AxioVision LE Canon Module. Los resultados se muestran en la tabla 10 y las mediciones realizadas se presentan en el anexo 3.

Tabla 10. Resultados de la medición del diámetro aparente.

Diámetro (mm)	Max.	Min.	Media	Desv. Est.
D₁ (0.20-0.39)	0.382	0.243	0.332	0.045
D₂ (0.40-0.59)	0.578	0.403	0.468	0.056
D₃ (0.60-0.79)	0.766	0.603	0.676	0.047

Se observa que en los tres rangos existe una similar variación de los datos respecto al promedio. Sin embargo los promedios de D_2 y D_3 se separan cerca de 0.20 mm. Esta variación en los datos, puede ser debida a las irregularidades del crecimiento de la fibra a lo largo de su longitud.

5.1.3. Área de la sección transversal

Para determinar el esfuerzo en unidades del Sistema Internacional fue necesario calcular el área de la fibra en tres distintos diámetros. Los resultados se muestran en la tabla 11 y las mediciones realizadas se presentan en el anexo 4.

Tabla 11. Resultados de la medición del área de la sección transversal.

Diámetro	Área			
	Max. (mm ²)	Min. (mm ²)	Media (mm ²)	Desv. Est.
D₁	0.076	0.044	0.062	0.011
D₂	0.191	0.110	0.150	0.011
D₃	0.282	0.202	0.238	0.030

Se observa que los promedios del área D_1 , D_2 y D_3 muestran una tendencia lineal, sin embargo D_3 presenta la mayor desviación estándar. En las figuras 35, 36 y 37, se muestra el área de las secciones transversales correspondientes a los diámetros D_1 , D_2 , D_3 , y dan una referencia del tamaño del área medida que fue usado para calcular el esfuerzo durante el ensayo de tensión.

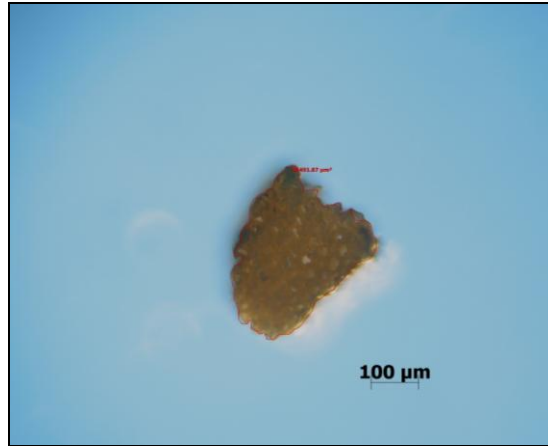


Figura 33. Sección transversal de las fibras de bagazo del intervalo D_1 (0.20-0.39 mm).



Figura 34. Sección transversal de las fibras de bagazo del intervalo D_2 (0.40-0.59 mm).

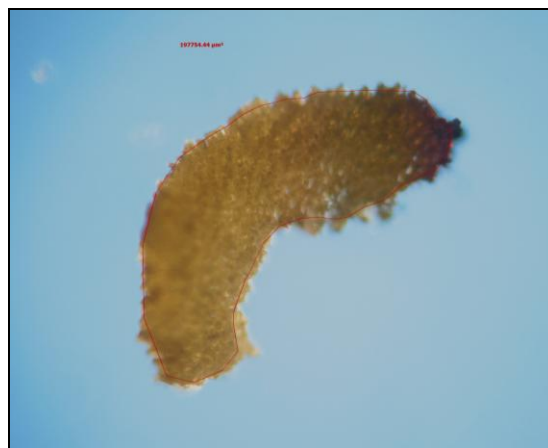


Figura 35. Sección transversal de las fibras de bagazo del intervalo D_3 (0.60-0.79 mm).

5.1.4. Identificación de la forma de la sección transversal

La figura 36 revela una sección transversal en forma de listón integrada por un grupo de microfibrillas o celdas que adoptan una forma poligonal, las cuales están unidas por un lumen. En esta misma imagen se aprecia el perímetro dañado en la sección media y lateral izquierda de la fibra, debido al daño mecánico ocasionado por los esfuerzos de corte y flexión de los trozos de agave hidrolizado en la etapa de molienda por el proceso artesanal del mezcal.

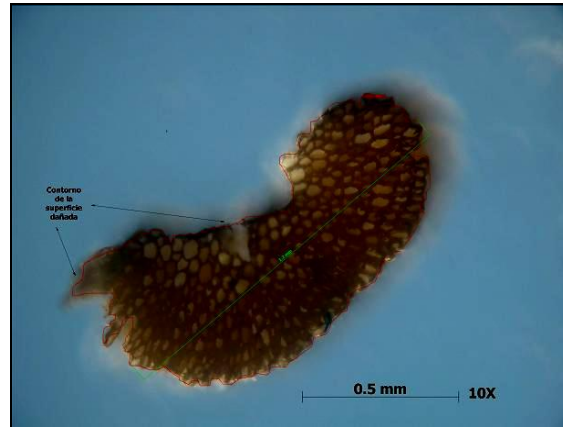


Figura 36. Sección transversal de la fibra de bagazo (100x).

Se observa también el lamela intermedia y las celdas poligonales, principalmente en forma hexagonal y pentagonal; el lumen o cavidad de la célula de cada celda, tiene esquinas redondeadas y su tamaño es mayor comparado con la pared secundaria. La figura 37 muestra el arreglo de las microfibrillas que forman la estructura interna de la fibra, en donde se aprecia que no contienen el lumen debido a los procesos a que ha sido sometido en el proceso artesanal de elaboración de mezcal.



Figura 37. Arreglo microestructural de la fibra de bagazo (500x).

5.2. Ensayos de tensión

El equipo utilizado fue la máquina de ensayos Instron modelo 4442 equipado con mordazas de sujeción Instron serie 2710-004 (Anexo 1), que se encuentra en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca. En cada uno de los experimentos, se generaron videos de los cuales posteriormente se capturaron los datos y se determinó la resistencia última a la tensión (RUT), módulo de elasticidad (ME) y deformación unitaria (DU) para cada probeta utilizando las ecuaciones 1, 2 y 3 presentadas en el capítulo 2. Finalmente, se aplicaron las medidas de tendencia central, de dispersión y se evaluó el efecto de cada tratamiento a través del análisis de varianza, utilizando las ecuaciones 5, 6 y 7 del capítulo cuatro.

5.2.1. En función del diámetro

Las condiciones para llevar a cabo la prueba en cada una de las secciones fueron las siguientes: longitud: 10 mm, velocidad de deformación: 5 mm/min. Para obtener los datos del equipo de ensayos en unidades del Sistema Internacional, se utilizó el área de la sección transversal promedio de cada diámetro. En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos y en el anexo 5 los parámetros de cada uno de los 60 ensayos.

Tabla 12. Resultados de los ensayos de tensión en función del diámetro.

Diámetro (mm)	RUT (MPa)				ME (GPa)				D U (mm/mm)			
	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.
0.20-0.39	30.70	5.70	14.83	6.33	0.41	0.04	0.20	0.10	0.39	0.14	0.24	0.08
0.40-0.59	87.36	28.16	51.30	16.07	1.04	0.30	0.63	0.20	0.40	0.15	0.25	0.08
0.60-0.79	160.10	42.80	86.51	32.29	2.15	0.65	1.26	0.37	0.44	0.08	0.26	0.08

Con el incremento del diámetro, RUT, ME y DU aumentan de 14.83 a 86.51 MPa, 0.20 a 1.26 GPa y 0.24 a 0.26 mm/mm, respectivamente. Las figuras 40, 41 y 42 grafican los comportamientos mencionados. Los resultados del análisis de varianza de un solo factor a los datos obtenidos (estadístico de la prueba F y P-value) para encontrar el nivel de significancia de la correlación r , se presentan en la tabla 13.

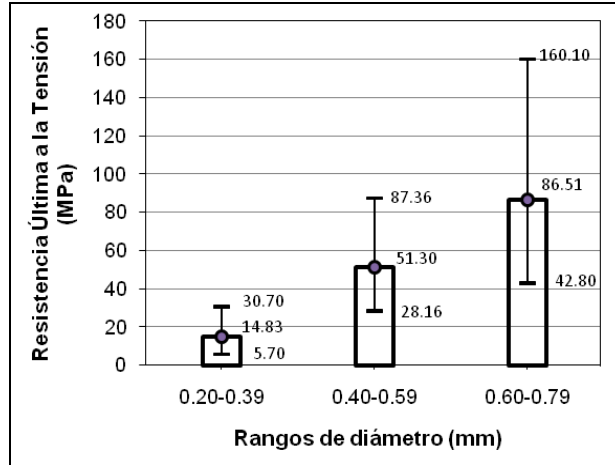


Figura 38. Influencia del diámetro en la resistencia última a tensión.

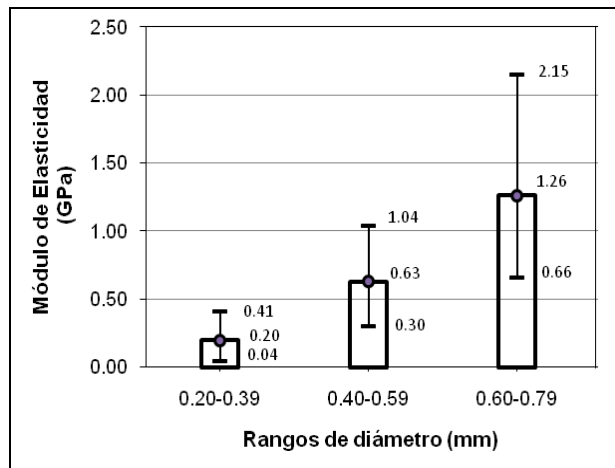


Figura 39. Influencia del diámetro en el módulo de elasticidad.

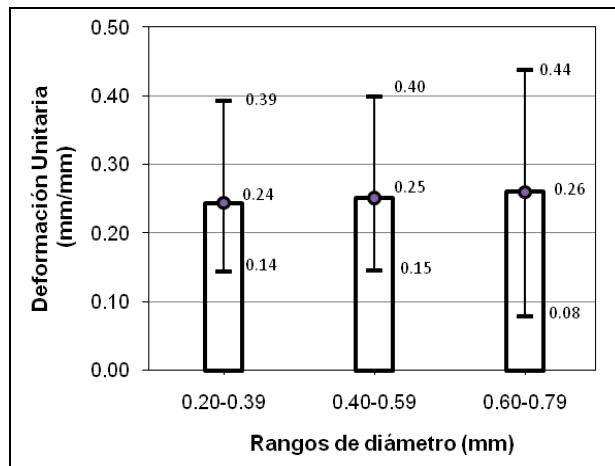


Figura 40. Influencia del diámetro en la deformación unitaria.

Tabla 13. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con tres diámetros.

Respuesta	Diámetro	Media	<i>r</i>	Estadístico F	Nivel de significancia P-value
RUT (MPa)	D1	14.83	0.800	52.904	0.000
	D2	51.30			
	D3	86.51			
ME (GPa)	D1	0.197	0.832	89.64	0.000
	D2	0.630			
	D3	1.263			
DU (mm/mm)	D1	0.243	0.102	0.237	0.600
	D2	0.256			
	D3	0.259			

En esta tabla se observa que respecto a RUT y ME, la diferencia entre los diámetros D_1 , D_2 y D_3 es significativa, esto es debido a que su nivel de significancia es menor de 0.05, para cada caso, lo que no sucede para DU, cuya significancia es mayor a 0.05. Por otro lado, la figura 41 presenta el trazado de las curvas típicas esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a los ensayos con longitud de 10 mm y rango de diámetros de 0.20 a 0.39 mm, 0.40 a 0.59 mm y 0.40 a 0.59 mm, realizados con una velocidad de deformación de 5 mm/min.

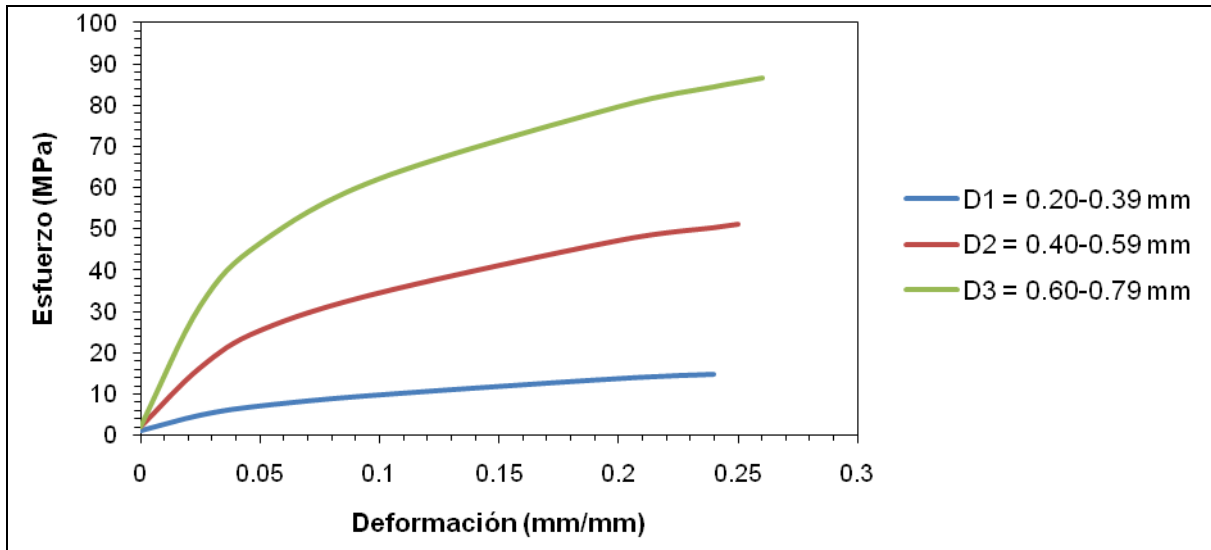


Figura 41. Curva típica esfuerzo deformación unitaria con tres diferentes diámetros.

5.2.2. En función de la longitud

Las condiciones para este experimento fueron las siguientes: diámetro de 0.20 a 0.39 mm, velocidad de deformación de 5 mm/min y tres longitudes de ensayo: 10, 15 y 20 mm. Para obtener el esfuerzo en unidades del Sistema Internacional, se utilizó el área de la sección transversal promedio de D_1 . En la tabla 14, se presentan los resultados y en el anexo 6 los parámetros de cada uno de los 60 ensayos.

Tabla 14. Resultados de los ensayos de tensión en función de la longitud.

Longitud (mm)	RUT (MPa)				ME (GPa)				D U (mm/mm)			
	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.
10	30.70	5.70	14.83	6.33	0.41	0.04	0.20	0.10	0.39	0.14	0.24	0.08
15	29.20	6.58	14.77	6.12	0.38	0.12	0.25	0.08	0.31	0.06	0.19	0.07
20	24.56	5.24	13.99	4.94	0.42	0.14	0.24	0.07	0.25	0.06	0.16	0.06

En la tabla se puede observar que al incrementar la longitud de la fibra de 10 mm a 20 mm, RUT disminuye de 14.83 a 13.99 MPa (figura 42) y ME incrementa de 0.20 a 0.24 GPa (figura 43) mientras que la DU disminuye de 0.24 a 0.16 mm/mm (figura 44).

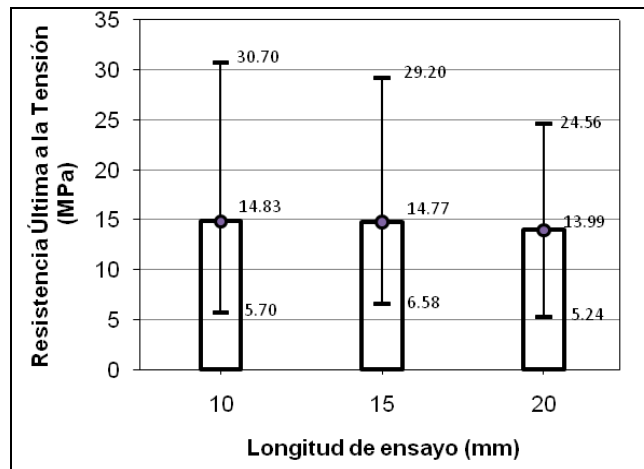


Figura 42. Influencia de la longitud en la resistencia última a la tensión.

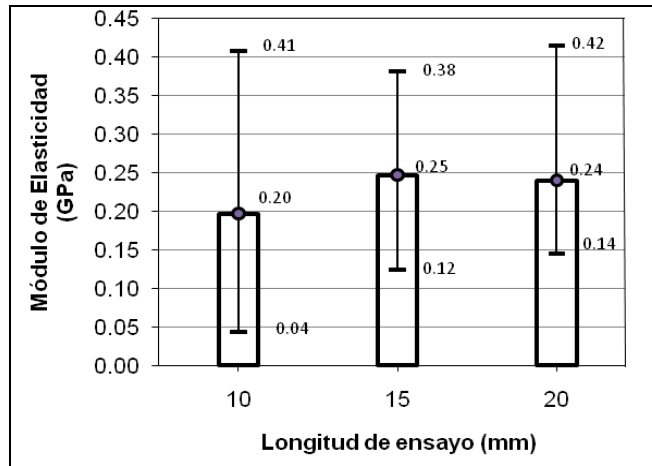


Figura 43. Influencia de la longitud en el módulo de elasticidad.

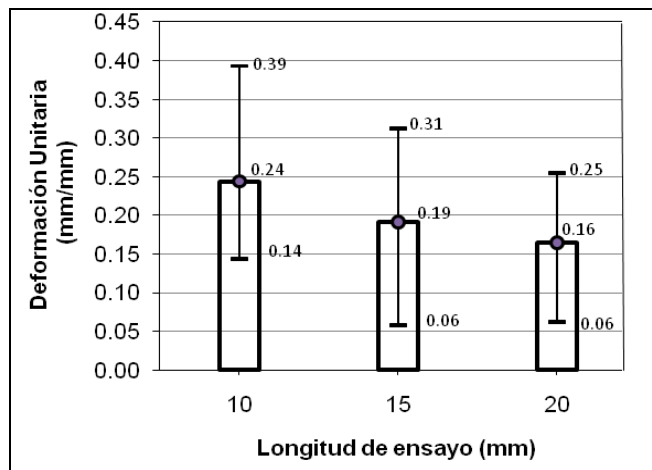


Figura 44. Influencia de la longitud en la deformación unitaria.

La Tabla 15 presenta los resultados del análisis de varianza para evaluar el nivel de significancia de la correlación r entre la longitud y las propiedades de las fibras (RUT, ME y DU). Con este tratamiento, la correlación r de DU es significativa al menos en la longitud de 10 mm, esto es debido a que su nivel de significancia es menor de 0.05, lo que no sucede para RUT y ME, cuyo valor de P-value es mayor a 0.05. Por otro lado, la figura 45 presenta el trazado de las curvas típicas esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a los ensayos con longitud de 10, 15 y 20 mm, diámetro de 0.20 a 0.39 mm y velocidad de 5 mm/min.

Tabla 15. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con tres longitudes.

Respuesta	Longitud (mm)	Medias	<i>r</i>	Estadístico F	Nivel de significancia P-value
RUT (MPa)	10	14.83	-0.060	0.1303	0.646
	15	14.76			
	20	13.98			
ME (GPa)	10	0.1970	0.211	2.1768	0.106
	15	0.2472			
	20	0.2401			
DU (mm/mm)	10	0.2438	-0.441	7.2535	0.000
	15	0.1913			
	20	0.1649			

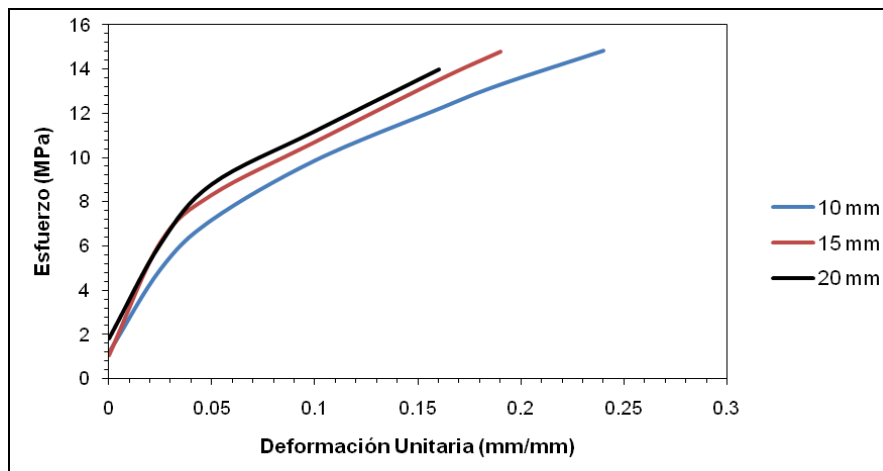


Figura 45. Curva típica esfuerzo-deformación unitaria con tres longitudes de ensayo.

5.2.3. En función de la velocidad

Los parámetros para llevar a cabo la prueba en cada una de las velocidades fueron: diámetro de 0.60 a 0.79 mm, longitud de 10 mm y velocidades de deformación de 1, 5 y 50 mm/min. La tabla 16 presenta los resultados obtenidos y en el anexo 7 se muestran los parámetros de cada uno de los 60 ensayos.

Tabla 16. Resultados de los ensayos de tensión en función de la velocidad.

Velocidad (mm/min)	RUT (MPa)				ME (GPa)				D U (mm/mm)			
	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.
1	151.10	55.20	92.38	24.31	1.82	0.76	1.30	0.31	0.38	0.10	0.24	0.08
5	160.10	42.80	86.50	32.29	2.15	0.65	1.26	0.37	0.43	0.07	0.26	0.08
50	193.00	53.00	114.30	40.11	3.23	1.23	1.93	0.74	0.50	0.07	0.23	0.10

En esta tabla se observa que al incrementar la velocidad de 1 a 50 mm/min, RUT aumentó de 92.38 a 114.30 MPa, ME de 1.30 a 1.93 GPa y DU se mantuvo estable entre 0.24 y 0.23 mm/mm. Las figuras 48, 49 y 50 presentan los resultados de estas propiedades.

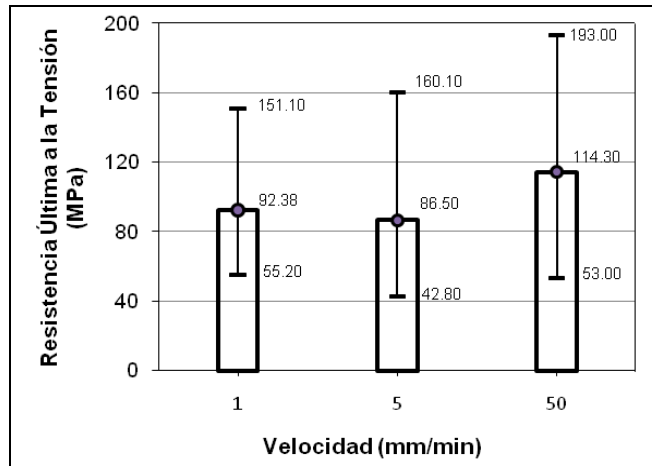


Figura 46. Influencia de la velocidad en la resistencia última a tensión.

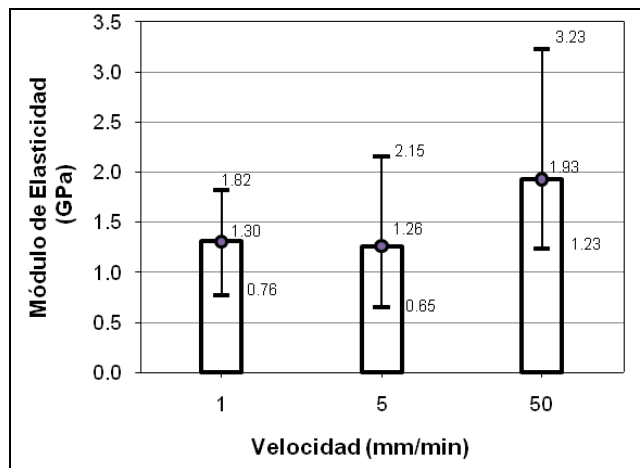


Figura 47. Influencia de la velocidad en el módulo de elasticidad.

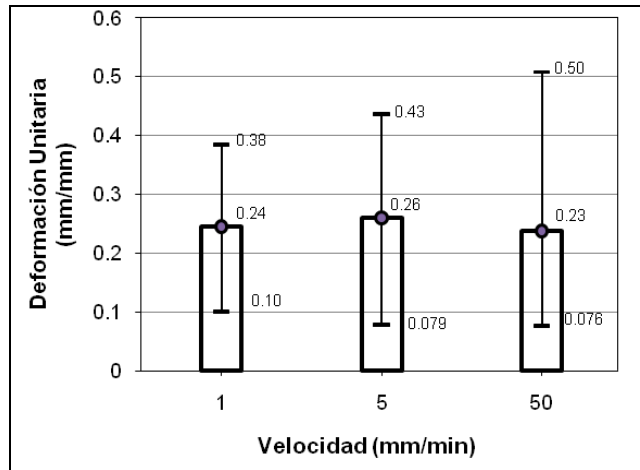


Figura 48. Influencia de la velocidad en la deformación unitaria.

La tabla 17 presenta los resultados del análisis de varianza para evaluar el nivel de significancia de la correlación r entre la velocidad y las propiedades de las fibras (RUT, ME y DU).

Tabla 17. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con tres velocidades.

Respuesta	Velocidad (mm/min)	Medias	r	Estadístico F	Nivel de significancia P-value
RUT (MPa)	1	92.38	0.359	4.4728	0.005
	5	86.50			
	50	114.30			
ME (GPa)	1	1.30	0.735	34.1959	0.000
	5	1.26			
	50	1.93			
DU (mm/mm)	1	0.244	-0.069	0.3035	0.600
	5	0.260			
	50	0.237			

El análisis de varianza demuestra que de las tres velocidades, para RUT y ME existe una diferencia significativa al menos en la velocidad de 50 mm/min, ya que su nivel de significancia es menor de 0.05, para cada caso; lo que no sucede para DU, cuyo valor de P-value es mayor a 0.05. La figura 49 presenta las curvas típicas esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a los ensayos realizados con las velocidades de deformación de: 1, 5 y 50 mm/min.

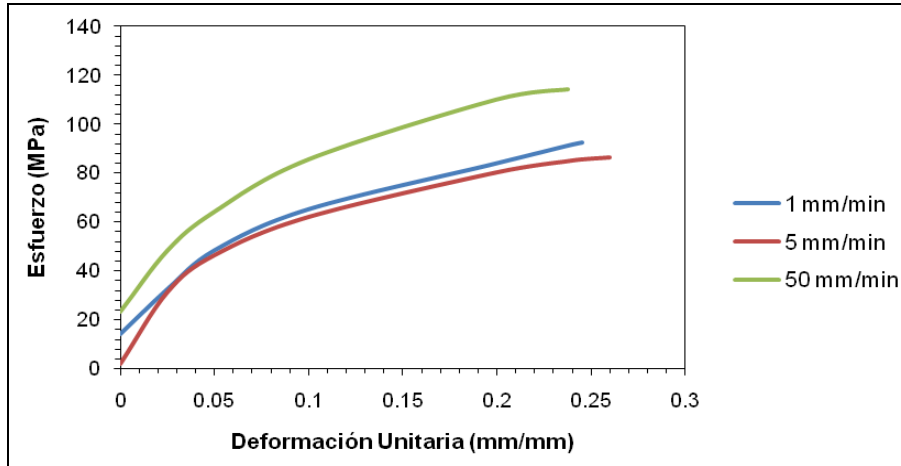


Figura 49. Curvas típicas esfuerzo-deformación unitaria con tres velocidades.

5.2.4. En función del tipo de fibra

Las condiciones para llevar a cabo este experimento fueron: diámetro de 0.20 a 0.39 mm, longitud 10 mm y velocidad de 5 mm/min. Para obtener los datos del equipo de ensayos en unidades del Sistema Internacional, se utilizó el área de la sección transversal promedio de D_1 . Los resultados se presentan en la tabla 18 y en el anexo 8 los parámetros de cada uno de los 40 ensayos.

Tabla 18. Resultados de los ensayos de tensión en función del tipo de fibra.

Fibra	RUT (Mpa)				ME (Gpa)				D U (mm/mm)			
	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.	Max.	Min.	Media	Desv. Est.
Bagazo	28.00	8.70	15.13	4.32	0.32	0.14	0.20	0.04	0.44	0.08	0.25	0.09
Testigo	144.70	42.60	86.50	30.56	1.85	0.53	1.02	0.37	0.62	0.25	0.38	0.10

Comparativamente, RUT aumentó de 15.13 a 86.5 MPa, ME de 0.20 a 1.02 GPa mientras que DU disminuyó de 0.25 a 0.38 mm/mm en los ensayos de fibras de bagazo contra las fibras testigo obtenidas de las pencas, respectivamente. Las figuras 52, 53 y 54 presentan los resultados promedio de estas tres propiedades mecánicas.

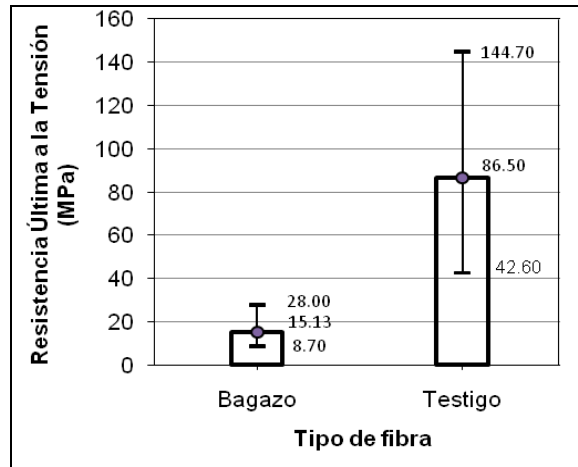


Figura 50. Influencia del tipo de fibra en la resistencia última a tensión.

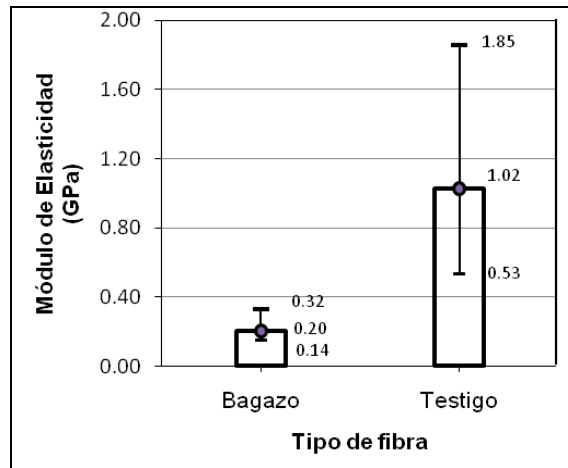


Figura 51. Influencia del tipo de fibra en el módulo de elasticidad.

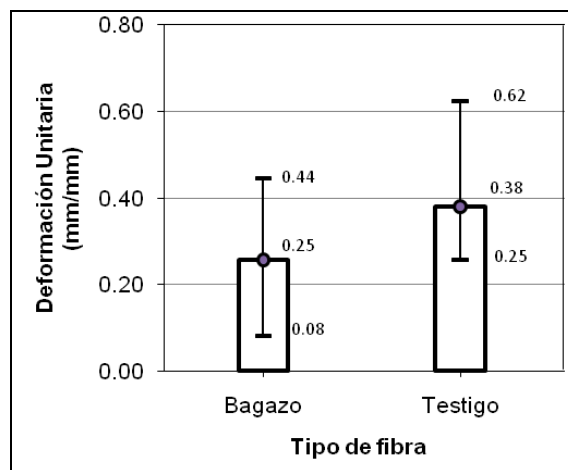


Figura 52. Influencia del tipo de fibra en la deformación unitaria.

La tabla 19 presenta los resultados del análisis de varianza para evaluar el nivel de significancia entre el tipo de fibra y sus propiedades mecánicas.

Tabla 19. Resumen del análisis de varianza de RUT, ME Y DU con dos tipos de fibra.

Variable Respuesta	Tipo de fibra	Medias	Estadístico F	Nivel de significancia P-value
RUT (MPa)	Bagazo	15.1325	106.916	0.000
	Testigo	86.5050		
ME (GPa)	Bagazo	0.2026	93.435	0.000
	Testigo	1.0276		
DU (mm/mm)	Bagazo	0.2573	15.359	0.000
	Testigo	0.3807		

El estadístico F con las medias de RUT, ME y DU muestra que existe diferencia significativa entre los dos tipos de fibra debido a que el nivel de significancia es menor de 0.05, por lo que las propiedades mecánicas de la fibra testigo son mayores que las de las fibra de bagazo. La figura 53 muestra las curvas típicas esfuerzo-deformación unitaria correspondiente a los ensayos con fibras testigo (FT) y fibras de bagazo (FB).

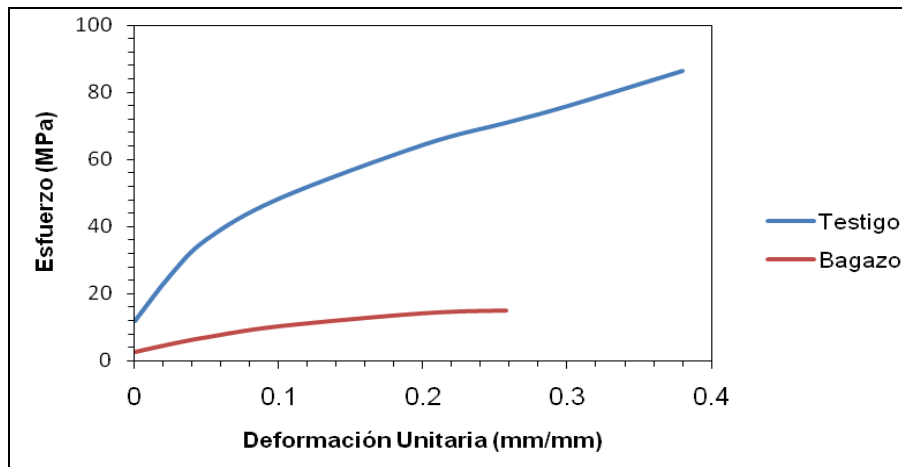


Figura 53. Curva típica esfuerzo-deformación unitaria con dos tipos de fibra.

5.3. Sumario

En este último capítulo se expuso el análisis de los resultados alcanzados en las actividades de la fase experimental para realizar los ensayos de tensión. Por un lado, las propiedades mecánicas a tensión de la fibra de bagazo están fuertemente influenciadas por el diámetro. Por otro lado, bajo las mismas condiciones de prueba la comparación de estas propiedades con las

de las fibras testigo mostro que son menores. A partir de estos resultados se generaron la mayor parte de las conclusiones, además de las recomendaciones sobre los trabajos futuros relacionados al estudio de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, las cuales se presentan en las siguientes secciones.

DISCUSIÓN

Los resultados de las determinaciones de humedad muestran que las fibras del bagazo contenían mayor humedad (cercana a 1%) que las fibras testigo. Esto puede ser debido a la ausencia del lumen característico, lo cual origina espacios vacíos que permiten alojar una cantidad mayor de agua libre en comparación con las fibras testigo obtenidas de las pencas. La variación de la longitud de la fibra es consecuencia de la etapa de molienda en el proceso de elaboración de mezcal, en donde la materia prima fue seccionada en trozos de distintos tamaños y de formas irregulares.

El efecto del diámetro sobre las propiedades mecánicas a tensión se comprobó con la prueba P-value y permitió determinar que existe una correlación directa con la resistencia última a la tensión y el módulo de elasticidad y no existe correlación con la deformación unitaria. Comportamiento similar se reportó en las fibras de coco de la India pues con el incremento del diámetro de 0.10 a 0.45 mm, la resistencia última a la tensión incremento de 106.59 a 177.50 MPa (Kulkarni et al., 1981), pero opuesto a la fibra de coco de Brasil donde con el incremento del diámetro de 0.040 mm a 0.40 mm, la resistencia última a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen de 275 MPa a 50 MPa y de 3.6 GPa a 1.2 GPa, respectivamente. (Satyanarayana et al., 2007). Estas diferencias pueden ser interpretadas a partir del origen de la fibra. Por ejemplo, en el proceso de obtención de bagazo y fibra, el agave se secciona en trozos de formas irregulares, se cuece en horno bajo tierra a 97° C, se muele con una maquina forrajera, se fermenta a manera natural y finalmente los mostos y el agave fermentado son destilados a 94° C, desechando el bagazo en la intemperie donde se expone a la luz solar y humedad medioambiental; este proceso somete a la fibra a esfuerzos térmicos por la cocción y destilación que la rigidizan, esfuerzos de corte y flexión por la molienda que le ocasionan daños en la superficie, la hidratación por la fermentación la flexibiliza, cambiando el comportamiento de sus propiedades mecánicas a tensión.

Respecto al efecto de la longitud, se determinó que existe una correlación inversa sobre la resistencia última a la tensión y la deformación unitaria y directa con el módulo de elasticidad, este efecto es similar a lo que se reporta para las fibras de Curauá de Brasil (Tomczak et al., 2007), y se explica porque la fibra experimenta esfuerzos que dañan su estructura y al incrementar la longitud aumenta el número de intersticios.

Por otro lado, se comprobó que existe una correlación directa de la velocidad de ensayo con la resistencia última a la tensión y la deformación unitaria, y correlación inversa con el módulo de elasticidad, manifestando un comportamiento viscoso a baja velocidad y elástico a alta velocidad. Esta simultaneidad en los comportamientos es debido a la estructura interna de la fibra, ya que bajo la acción de la carga a alta velocidad la estructura interna de la fibra no se relaja y la tensión originada depende principalmente del componente elástico comportándose como un resorte. Esto se explica porque las fibras vegetales están formadas por una estructura multicelular que se deforma gradualmente hasta lograr la misma deformación bajo la acción de la carga a baja velocidad, donde el esfuerzo originado depende principalmente del componente viscoso caracterizado por un amortiguador.

Las propiedades mecánicas de las fibras del bagazo son menores que las de las fibras testigo extraídas de las pencas en estado verde debido a los daños que experimentan las primeras en su estructura física por los esfuerzos mecánicos y térmicos por el procesamiento de la fibra.

Finalmente la tabla 20 presenta algunas de las aplicaciones a las que las se les pudiera orientar, principalmente por sus propiedades mecánicas a tensión y los nuevos mercados que están surgiendo, en los cuales ya se han usado otras fibras lignocelulósicas de origen vegetal.

Tabla 20. Aplicaciones para las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw.

Aplicación
<ul style="list-style-type: none">• Material de refuerzo en una matriz polimérica para formar compuestos para la industria del automóvil• Geotextiles biodegradables para revestir y recuperar suelos erosionados• Material de refuerzo en tableros aglomerados para la industria de la construcción• Material de aislamiento térmico y acústico para la industria de la construcción• Biomaterial para absorber el petróleo derramado en mares, lagos y ríos• Substrato artificial para la producción hidropónica• Revestimiento de alfombras

CONCLUSIONES

La variación del diámetro tiene un efecto en las propiedades mecánicas a tensión con el siguiente comportamiento: con el incremento del diámetro de 0.20 a 0.79 mm, RUT, ME y DU aumentan de 14.83 a 86.51 MPa, 0.20 a 1.26 GPa y 0.24 a 0.26 mm/mm, respectivamente.

El cambio de la longitud del espécimen tienen un efecto en las propiedades mecánicas a tensión con la siguiente tendencia: con el incremento de 10 a 20 mm, RUT disminuye de 14.83 a 13.99 MPa y ME incrementa de 0.20 a 0.24 GPa mientras DU disminuye de 0.24 a 0.16 mm/mm. Con este tratamiento, la correlación r de DU es significativa al menos en la longitud de 10 mm, esto es debido a que su nivel de significancia es menor de 0.05, lo que no sucede para RUT y ME, cuyo valor de P-value es mayor a 0.05.

La variación de la velocidad influye en la respuesta mecánica de las propiedades de la fibra ya que al incrementar la velocidad de 1 a 50 mm/min RUT aumentó de 92.38 a 114.30 MPa, ME de 1.30 a 1.93 GPa y DU se mantuvo estable entre 0.24 y 0.23 mm/mm. Este comportamiento es debido a que manifiesta un comportamiento viscoso a baja velocidad y elástico a alta velocidad.

La fibra obtenida de las pencas de 0.20 a 0.39 mm de diámetro presenta una RUT de 86.50 MPa, ME de 1.02 GPa y DU de 0.38 mm/mm. Comparativamente, la RUT es cuatrocientos setenta por ciento mayor que la fibra del bagazo ensayadas en el mismo intervalo de diámetro. Los resultados promedio de este trabajo se comparan en la tabla 21 con los encontrados en estudios de otras fibras vegetales.

Tabla 21. Comparativo de propiedades mecánicas a tensión de fibras vegetales.

Fibra	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU	Referencia
<i>Agave angustifolia</i> Haw (hojas)	233-389	15.50-19.49	1.54-2.41 ^a	Silva –Santos et al., (2009)
<i>Agave angustifolia</i> Haw (bagazo)	14.83-86.51	0.20-1.26	0.24-0.25 ^b	Este estudio
<i>Agave angustifolia</i> Haw (testigo)	42.6-144	0.53-1.85	0.25-0.62 ^a	Este estudio
<i>Agave tequilana</i> Weber (bagazo)	189.48	11.74	4.91 ^b	Satyanarayana et al., (2009)
Bagazo (Caña de azúcar)	29.6	-	-	Justiz-Smith et al., (2007)

a: %, b: mm/mm, DU : Deformación unitaria a la rotura.

Además, el comportamiento de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw es viscoelástico, ya que existe una relación no lineal entre la carga aplicada y la deformación resultante, que forma una curva e indica el incremento en la velocidad de deformación producido por el aumento en el esfuerzo y con ello la variación de la resistencia última a la tensión.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis de la sección transversal y longitudinal de la fibra por medio de microscopía electrónica de barrido, que ayude a entender mejor la morfología de la fibra del bagazo del *Agave angustifolia* Haw.
2. Realizar tratamientos químicos a la fibra como la mercerización o tratamiento alcalino, que lleven a mejorar sus propiedades físico-mecánicas.
3. Realizar estudios relacionados con la aplicación en la formación de nuevos productos y materiales compuestos de la industria aeronáutica, automotriz, geotextiles, muebles, entre otros.
4. Evaluar la aplicación de fibras como material de refuerzo para formar compuestos, utilizando una matriz polimérica ó en la industria de la construcción (adobe), considerando los siguientes factores: la longitud de la fibra, la cantidad y la distribución utilizada; efectuando un análisis sobre la adherencia entre la fibra y la matriz; y finalmente evaluar la resistencia del compuesto obtenido.

REFERENCIAS

Avallone, E. A., y Baumeister, T. (1999). IV. Materials of Engineering, *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers* (10th Edition), The McGraw-Hill Companies.

Baena-González, A. (2005). Aprovechamiento del bagazo del maguey verde (*Agave salmiana*) de la agroindustria del mezcal en San Luís Potosí para la producción de Hongo Ostra (*Pleurotus Ostreatus*). Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Baird, D. C. (1991). *Experimentación una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. México: Prentice Hall.

Balam-Cocom, R. J. Duarte-Aranda, S. y Canche-Escamilla, G. (2006). Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la piña de henequén y propileno. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(Su1), p 39-44.

Baley, C. (2004). Influence of kink bands on the tensile strength of flax fibers, *Journal of Materials Science*, 39, p 331-334.

Beltrán-Fernández, J. A., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Villa y Rabasa, G., Rodríguez-Cañizo, R. G., y Mendoza, M. A. (2004). Análisis numérico experimental de la mecánica de fractura en materiales polímeros, *Científica*, 8 (4), p 185-192.

Beakou, A., Ntenga, R., Lepetit J., Ateba, J. A., y Ayina, L.O. (2008). Physico-chemical and microstructural characterization of "*Rhectophyllum camerunense*" plant fiber, *Journal of Composites Part A: applied science and manufacturing*, 39, p 67-74.

Bessadok, A., Marais, S., Roudesli, S., Lixon, C. y Metamayer M., (2008). Influence of chemical modifications on water-sorbition and mechanical properties of Agave fibers. *Journal of Composites Part A: applied science and manufacturing*, 39, p 29-45.

Bodros, E. y Baley, C. (2007). Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica Dioica*). *Journal of Material letters*, 62 (14), p 2143-2145.

Calvo, C. C. y de Morales, J. L. (1988). Manual de técnicas de Laboratorio para el análisis de alimentos. México: Instituto Nacional de la Nutrición "Salvador Zubirán" Publicación L-63.

Cazaurang-Martínez, M. N., Herrera-Franco, P. J., González-Chi, P. I. y Aguilar-Vega, M. (1991). Physical and mechanical properties of Henequen fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 43, p 749-756.

Cervantes-Ramírez, M. C. (2002). *Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México*. México: Instituto de Geografía UNAM. Obtenido el 01 de octubre de 2007, de <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/temas-sel/plazorico/art4.pdf>

Chernova, T. E., y Gorshkova T. A. (2007). Biogenesis of Plant Fibers. *Russian Journal of Developmental Biology*, 38(4), p 221-232.

Clemons, C., y Caulfield, D. (2005). *Natural fibers*, Xanthos, M (ed), Functional Fillers for Plastics, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, p 195-206.

d'Almeida, J. R. M., Aquino, R. C. M. P. y Monteiro, S. N. (2005). Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of Piassava (*Attalea funifera*) fibers. *Journal of Composites Part A: applied Science and Manufacturing*, 37, p 1473-1479.

El-Tayeb, N. M. (2009). Development and characterisation of low-cost polymeric composite materials, *Journal of Materials and Design*. 30, p 1151–1160.

Escoto-García, T., Vivanco-Castellanos, E., Lomeli-Ramírez, M. y Arias-García, A. (2006). Tratamiento fermentativo-químico-mecánico del bagazo de maguey (*Agave Tequilana* Weber) para su aplicación en papel hecho a mano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(Su1), p 23-27.

Ezau, K. (1980). *Anatomiya semennykh rastenii* (Anatomy of Seed Plants), Moscow: Mir.

FAO, (2007a). Consulta sobre fibras naturales no. 2, La evolución paralela de los precios del yute y las fibras duras con los precios del polipropileno y el petróleo crudo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido el 15 de junio de 2008, de http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/341/es/OILDOCUMENT_SPANISH.pdf

FAO, (2007b), Consulta sobre fibras naturales no. 3, Situación del mercado de las fibras duras, el yute y otras fibras naturales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido el 14 de septiembre de 2008, de http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/341/es/CURRENT_SITUATION_SPANISH.pdf

FAO, (2008), Background Note on Natural Fibres, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido el 14 de septiembre de 2008, de http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/322/en/Background_Note_on_Natural_Fibres.pdf

Fahn, A. (1990). *Plant Anatomy*, Oxford: Pergamon.

Gañan, P., y Mondragon, I. (2004). Fique fiber reinforced polyester composites: effects of fiber surface treatments on mechanical behavior. *Journal of materials science*, 39, p 3121-3128.

Guillen, G., Olvera, M., Islas, A. M. y Mercado, L. E. (2005). Una contribución al estudio del comportamiento viscoelástico de hilos textiles sometidos a tracción, *Contactos*, (57), p 5-12.

Gyorgy, S. (1986). The development and importance of agricultural mechanics, *Mechanics of Agricultural Materials*, Elsevier Science Publishers. New York.

Hernández-Gómez, L. H. y Ruiz, C. (1993). Assesment of data for crack initiation under shock pressure loading. Part I. Experiment, *Theoretical and applied fracture mechanics*, 19 (1), p 75-83.

Holbery, J. y Houston, D. (2006). Natural-fiber Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 58 (11), p 80-86.

Idarraga, G., Ramos, J., Zúñiga, V., Sahin, T. y Young, R. (1999). Pulp and Paper from Blue Agave Waste from Tequila Production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (47) 10, p 4450-4455.

Infante-Gil, S. y Zarate de Lara, G. (1990). *Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario*. México: Trillas.

Instron, (2006). *Accessories for Materials Testing*. (WB1180C), 3er edition, Instron Corporation.

Iñiguez-Covarrubias, G., Lange, S. y Rowell, R. (2001). Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: Agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. *Journal of Bioresource Technology*, 77(2), p 101-108.

Iulius, O. (2004). Bagasse Fiber For Producción of Nonwoven Materials. Tesis de Doctorado. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.

Juárez, A. C., Rodríguez, L. P. Rivera, V. R., y Rechy, V. R. M. (2003). Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en el concreto. *Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo Leon*, 6(4), p 465-476.

Justiz-Smith, N. G., Junior Virgo, G. G. y Buchanan, V. E. (2007). Potential of Jamaican Banana, Coconut Coir and Bagasse Fibres as Composite Materials. *Journal of Materials Characterization*, 59 (9), p 1273-1278.

Kelly, A. y Zweben, C. (2000), "Comprehensive Composites Materials", Elsevier 2000.

Kulkarni, A. G. Satyanarayana, K. G. Sukumaran, K. Rohatgi, P. K. (1981). Mechanical behavior of coir fibres under tensile load, *Journal of Materials Science*, 16 (4), pp. 905-914.

Kulkarni, A. G., Satyanarayana, K. G., Rohatgi, P. K., Vijayan, Kalyani (1983). Mechanical properties of banana fibres (*Musa sepientum*). *Journal of Materials Science*, 18. pp. 2290-2296.

Lohr, S. (2000). *Muestreo Diseño y Análisis*. México: Thomson Internacional.

López Amo, F. y Pons, J. M. (1975). Método de ensayo para la determinación del módulo inicial de elasticidad de las fibras individuales, *Annales Scientifiques Textiles Belges*, 2, p 15-23.

López-Matadamas, S. (1999). Diseño de un sistema de molienda para el agave en el proceso de elaboración del mezcal, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional.

Martínez-Gutiérrez, G. A., Zarate-Altamirano, G., Contreras, Y., Rubio-Espinoza, M., Tovar, E., Ventura, E., Tenorio, A., Bautista, J. I. (2006). Estudios para la utilización del bagazo residual de la industria del mezcal como sustrato en cultivo sin suelo de plantas Parte 1. Caracterización física, química y biológica. 10º Foro Estatal de Investigación científica y tecnológica, *Memoria Oaxaca COEPES*, p 42-43.

Maya, J. J. y Sabu, T. (2007). Biofibres and Biocomposites. *Journal of Carbohydrate Polymers*, 71 (3), p 343-364.

Mohanty, A. K., Misra, M., y Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276/277, p 1-24.

Moshenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.

Montgomery, D. C. (1991). *Diseño y Análisis de Experimentos*. México: Grupo Editorial Iberoamericana.

Montgomery D. C., y Runger G. (2008). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México: Limusa Wiley.

Morali Mohan Rao, K Mohana Rao, K 2005, Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo, *Journal of Composite Structures*, 77, p 288-295.

Mukherjee, P. S. y Satyanarayana, K. G. (1984). Structure and properties of some vegetable Fibres: Part 1 Sisal fibre. *Journal of Materials Science*, 19, p 3925-3934.

NMX-AA-015-1985. Protección al ambiente - Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales – Muestreo – Método de Cuarteo. Normas mexicanas.

NMX-AA-019-1985. Protección al ambiente - Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales – Muestreo – Peso volumétrico “In Situ”. Normas mexicanas.

NMX-AA-069-1990. Determinación de la carga de ruptura, tenacidad y alargamiento por el método de hilo individual. Normas mexicanas.

Popov, E. P. (2000). *Mecánica de Sólidos*, México: Pearson Educación.

Ramírez-Rodríguez, T., (2005), Análisis reológico en diferentes tipos de hilos textiles para determinar su comportamiento mecánico, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional.

Reddy, N. y Yang, Y. (2005). Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *Journal of TRENDS in Biotechnology*, 23(1), p 22-27.

Reddy, N. y Yang, Y. (2007). Characterizing natural cellulose fibers from velvet leaf (*Abutilon Theophrasti*) stems. *Journal of Bioresource Technology*, en prensa.

Riedel, U. y Nickel, J. Germany, Applications of natural fiber composites for constructive parts in aerospace, automobiles, and other areas, Volume 10, General Aspects and Special Applications, Biopolymers, Steinbüchel, Alexander (ed.), 10 Volumes + Index, 1. Edition - April 2003, Wiley-VCH, Weinheim, Handbook/Reference Book.

Satyanarayana, K. G., Guimaraes, J. L. y Wypych, F. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Journal of Composites Part A: applied science and manufacturing*, 38, p 1694-1709.

Satyanarayana, K. G., Sydenstricker, T. H. D., Dos santos, I. P., Dos santos, J. y Mazzaro, I. (2009). Characterization of mexican blue agave bagasse and pita lignocellulosic fibers. (Presentación de Trabajo/International Congress on Natural Fibres).

Silva-Santos, L., Hernández-Gómez, H., Caballero-Caballero, M. y López-Hernández, I. (2009). Tensile strength of fibers extracted from the leaves of the angustifolia Haw Agave in function of their length. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, 15, p 103-108.

Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera 2006, Anuario estadístico de la producción agrícola de *Agave angustifolia* Haw. Obtenido el 28 de marzo del 2009 de bases de datos de SIAP.

Sofyan, M. S., Umemura, K. y Kawai, S. (2007). Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles. *Journal of Wood Science*, 53, p 108-113.

Stamboulis, A., Baillie, C., Garkhail, S., Van Melick, H. y Peijs, T. (2000). Environmental durability of flax fibres and their composites based on polypropilene matrix. *Journal of Applied Composite Materials*, 7, p 273-294.

Tomczak, F., Sydenstricker, T. H. D. y Satyanarayana, K. G. (2007a). Studies on lignocellulosics fibers of Brazil: Part III - Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Journal of Composites part A: applied science and manufacturing*. 38, p 1710-1720.

Tomczak, F., Satyanarayana, K. G. y Sydenstricker, T. H. D. (2007b). Studies on lignocellulosics fibers of Brazil: Part III - Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Journal of Composites part A: applied science and manufacturing*, 38(7), p 1649-1709.

Van Dam, J.E.G. y Gorshkova, T.A. (2003) Plant Growth and Development: Plant Fiber Formation, Chapter MS 46, *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Oxford: Academic, p 87–96.

Villa y Rabasa, G., Sandoval-Pineda, J. M., Campos-Vázquez, A., Escamilla-Navarro, A., Luna-Avilés, A., y Balanzá-Chavarría, J. C. de J. (2007). Reseña de los proyectos de investigación realizados en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la SEPI-ESIME. *Científica*, 11 (2), p 73-82.

Villaseñor-Perea, C. A., Chávez-Franco, S. H., Saucedo-Veloz, C. Salazar-Zazueta, A., Landois-Palencia, L. L., y Hernández-Gómez, L. H. (2006). Comportamiento mecánico y fisiológico de frutos del melón (*Cucumis Melo* L.) bajo compresión uniaxial. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (2), p 157-162.

Warner, S. B. (1995). *Fiber Science*. New Jersey: Prentice Hall, Inc., Pearson Education Company, p 316.

Zah, R., Hischer, R., Leão, A. L. y Braun, I. (2007). Curauá fibers in the automobile industry-a sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 15, p 1032-1040.

Zeiss. (2000). Manual del microscopio Axiolab para luz transmitida y epifluorescencia. Estados Unidos: Zeiss.

ANEXOS

ANEXO 1
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS MORDAZAS

En este anexo se describen las características técnicas de las mordazas que se emplearon en el Texturómetro Instron modelo 4442, para realizar las pruebas de tensión en fibras del bagazo.



Serie 2710

Mordazas con tornillo de acción lateral

Numero de catalogo 2710-004

Características

- Capacidad nominal: 500 N (50 kgf, 112 lbf)
- Diseño abierto al frente para facilitar la carga del espécimen
- Caras intercambiables de la mandíbula para sujetar diferentes tipos de materiales
- Adecuado para una gran variedad de espesores del espécimen sin que sea necesario cambiar caras de la mandíbula
- Autoalineable, lado de sujeción para especímenes de diferentes espesores y de tipo asimétrico, por ejemplo, falla al corte
- Simple y conveniente ajuste manual de la fuerza de sujeción
- Diseño rugoso para mínimo mantenimiento
- Fabricado en acero inoxidable para proveer excelente resistencia a la corrosión
- Diseñado usarse en condiciones ambientales y no ambientales de experimentación
- Rango de temperatura: 0 a +100 °C (+32 °F a +212 ° F)

Descripción

Los tornillos de agarre lateral proveen un método muy simple y eficiente para sujetar especímenes de prueba planos en aplicaciones donde debe insertar fácilmente el espécimen y aplicar rápidamente la fuerza de sujeción.

Las caras de la mandíbula pueden estar ajustadas para acomodar diferentes espesores de espécimen, esto asegura que la línea de fuerza de tensión permanece concéntrica con el cuerpo de la mordaza.

Pueden ser equipados con una selección de caras intercambiables de la mandíbula de la mordaza en diversos tamaños y selección de superficies que incluyen superficie suave, de caucho y aserrada. También están disponibles líneas de contacto y caras recubiertas especiales.

Principio de Operación

Estas mordazas con tornillo lateral de sujeción están diseñadas con una cara de agarre que es regulable para compensar el espesor de la muestra a fin de que la línea de fuerza de tensión pueda hacerse coincidir con el centro de la mordaza. Las caras intercambiables de la mandíbula son montadas de tal manera que son libres para dar vueltas en todas las direcciones. Esta acción tiene prevista una auto-alineación para compensar las pequeñas variaciones en el espesor de muestra.



Mordazas con tornillo lateral de sujeción para prueba de materiales rango desde alambres finos hasta telas

Gama de Aplicaciones

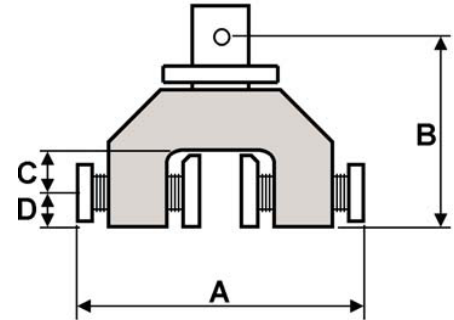
- Tipo de carga: Tracción. Inadecuado para ensayos a través del cero o fatiga.
- Material del espécimen: Hojas delgadas, películas, láminas, hilos, cintas plásticas, alambres finos, telas y materiales suaves.
- Forma del espécimen: Especímenes redondos (alambres) y planos con o sin sección de sujeción en los extremos.

Serie 2710 Mordazas con tornillo de acción lateral

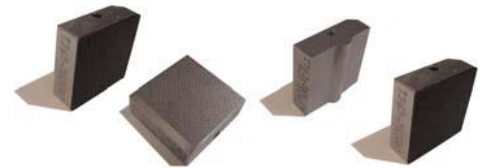
Numero de catalogo 2710-004

Especificaciones

Número de catálogo	2710-004
Capacidad máxima	500 N (50 kgf, 112 lbf)
CONEXIÓN MECÁNICA	
Eje de mordaza superior	Perno de 6 mm (Tipo Om)
Eje de mordaza inferior	Perno de 6 mm (Tipo Om)
Ancho total de la mordaza (A)	93 mm (3.6 pulg)
LONGITUD EFECTIVA (B)	
Mordaza superior	67 mm (2.6 pulg)
Mordaza inferior	67 mm (2.6 pulg)
Profundidad de la garganta (C)	13 mm (0.5 pulg)
Profundidad de la garganta (D)	13 mm (0.5 pulg)
PESO POR MORDAZA	
Peso	490 g (1 lb)
Rango de temperaturas	0 °C a 100 °C (32 °F a 212 °F)
Principio de trabajo	Tornillo lateral de acción de sujeción
Fuerza de sujeción	Ajustable, aplicado manualmente



Dimensiones de la mordaza



Una selección de mandibulas intercambiables está disponible para una variedad de aplicaciones

Notas:

1. El número del catálogo de la mordaza provee dos mordazas.
2. Las mordazas requieren un acoplamiento para conectar la celda de carga a la base de la máquina.
3. La mordaza superior puede requerir un acoplamiento flexible para ciertas aplicaciones.

Numero de catalogo	2702-130	2702-131	2702-132	2702-133
Espesor del Espécimen	0 a 12 mm (0 a 0.5 pulg)	0 a 12 mm (0 a 0.5 pulg)	0 a 12 mm (0 a 0.5 pulg)	0 a 12 mm (0 a 0.5 pulg)
Superficie	Base suave	Diamante aserrado (profundidad 1 mm)	Cubierta de caucho	Línea de contacto ³
Área de sujeción (W x H)	25 mm x 25 mm (1 in x 1 in)	25 mm x 25 mm (1 in x 1 in)	25 mm x 25 mm (1 in x 1 in)	25 mm (1 pulg) ancho x 4 mm (0.15 in) de radio de la superficie convexa
Aplicaciones	Para sujetar hojas delgadas, películas, laminilla, papel y cintas	Para sujetar plástico, telas y materiales suaves	Para sujetar telas, cintas plásticas y alambres finos	Para sujeción de telas elásticas, papel y película plástica rígida

Notas:

1. El número de catalogo proporciona cuatro caras.
2. Todas las caras están endurecidas de 60 Rc a 65 Rc, excepto la cubierta de caucho y si otro es especificado.
3. Las líneas de contacto de la cara en 2710-004 están provistas de una cubierta de caucho en la cara opuesta.



Sede corporativa
100 Royall Street, Canton, Massachusetts 02021-1089, EE.UU.
Tel: +1 800 564 8378 o +1 781 575 5000 Fax: +1 781 575 5725

Sede central europea
Coronation Road, High Wycombe, Bucks HP12 3SY, Reino Unido.
Tel: +44 1494 464646 Fax: +44 1494 456123

Grupo de productos industriales
900 Liberty Street, Grove City, PA 16127-9005, EE.UU.
Tel: +1 800 726 8378 o +1 724 458 9610
Fax: +1 724 458 9614

www.instron.com

Instron es una marca comercial registrada de Instron Corporation. Otros nombres, logotipos, iconos y marcas que identifiquen a productos y servicios aquí mencionados son marcas comerciales de Instron Corporation y no pueden usarse sin permiso previo por escrito de Instron. Los demás nombres de productos y compañías mencionados son marcas comerciales o nombres comerciales de sus respectivas compañías.

Copyright © Instron 2004. Todos los derechos reservados.
Todas las especificaciones de este folleto están sujetas a cambios sin previo aviso.

ANEXO 2
MEDICIÓN DE LA LONGITUD DE LAS FIBRAS

En el siguiente apartado se presentan los resultados de las mediciones de la longitud de las mil fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw.

RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LONGITUD DE FIBRA.

Numero de datos: 1000

No. intervalo	No. de datos	Media (mm)
1	5	62
2	23	74
3	29	86
4	54	98
5	80	110
6	109	122
7	160	134
8	184	146
9	127	158
10	108	170
11	62	182
12	35	194
13	17	206
14	6	218
15	1	230

ANEXO 3
DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO APARENTE DE LAS FIBRAS

En el siguiente anexo se reportan los resultados del diámetro aparente de las fibras, agrupadas en nueve muestras de veinte unidades experimentales cada una.

A. Imágenes



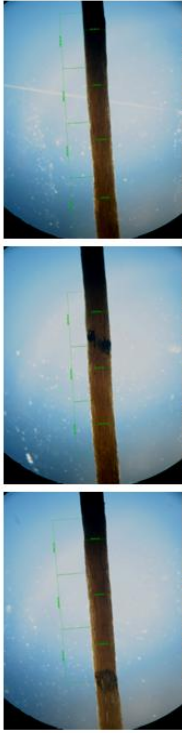
Vista longitudinal de 10 mm de las fibras del intervalo D₁ (0.20-0.39 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm

No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (μm)	PROMEDIO (mm)
1	395.46	384.86	390.83	350.47	357.60	342.17	368.26	358.38	349.77	369.19	366.70	0.367
2	379.49	375.70	375.70	374.11	360.13	357.68	351.77	381.44	380.12	355.04	369.12	0.369
3	290.32	305.85	297.49	278.50	282.00	288.02	292.71	262.84	258.06	266.95	282.27	0.282
4	342.91	344.38	344.19	341.80	335.89	339.66	363.99	393.22	382.59	370.44	355.91	0.356
5	384.71	385.90	379.94	388.29	394.27	376.34	364.40	376.35	384.71	389.49	382.44	0.382
6	302.95	307.98	296.07	301.84	296.17	273.91	258.40	258.77	258.29	253.63	280.80	0.281
7	379.05	363.40	387.10	375.15	378.73	391.41	371.14	370.58	397.24	401.73	381.55	0.382
8	365.59	373.95	347.67	357.23	365.59	376.34	358.42	358.42	348.86	373.95	362.60	0.363
9	252.09	222.22	201.91	236.56	245.86	242.09	254.88	277.31	251.54	248.25	243.27	0.243
10	355.29	345.95	344.62	351.46	329.18	344.44	339.44	333.55	364.47	355.00	346.34	0.346
11	321.08	319.18	319.32	319.57	295.65	293.99	277.20	279.58	316.62	322.60	306.48	0.306
12	241.40	341.81	327.88	307.43	310.99	318.25	371.23	346.34	346.68	349.51	304.43	0.304
13	362.13	365.79	368.05	352.90	379.00	379.93	368.17	353.81	369.41	350.09	364.93	0.365
14	344.19	347.84	360.86	348.88	363.20	357.23	359.62	322.58	346.72	344.49	349.56	0.350
15	375.78	368.92	370.58	380.68	364.15	350.87	342.53	348.41	340.91	344.91	358.77	0.359
16	370.86	358.87	367.42	378.86	352.84	363.05	396.68	401.10	371.40	383.88	374.50	0.374
17	358.62	344.09	345.33	342.94	336.95	334.70	346.48	364.40	370.39	354.84	349.87	0.350
18	282.78	280.14	273.07	288.57	298.18	300.57	294.88	254.20	252.27	286.45	281.11	0.281
19	262.84	240.14	244.93	235.67	227.38	248.74	249.70	258.09	252.12	244.92	246.45	0.246
20	334.60	321.57	351.27	342.92	351.26	362.08	331.25	356.13	330.96	334.70	341.67	0.342

A. Imágenes



Vista longitudinal de 10 mm de las fibras del intervalo D₂ (0.40-0.59 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm

No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (µm)	PROMEDIO (mm)
1	538.61	562.72	574.70	556.75	536.44	540.02	560.33	543.61	562.72	568.74	554.46	0.554
2	468.35	471.92	458.80	426.61	422.94	412.19	428.00	427.74	431.58	448.30	439.64	0.440
3	435.02	440.86	440.87	456.52	473.12	422.98	413.52	425.37	427.78	441.27	437.73	0.438
4	553.51	553.51	536.33	512.00	542.26	570.80	552.36	544.87	538.53	504.06	540.82	0.541
5	464.81	481.49	456.39	443.25	438.47	446.83	448.03	419.35	416.97	427.72	444.33	0.444
6	542.64	548.54	561.68	523.56	532.96	513.77	512.71	543.87	525.04	523.56	532.83	0.533
7	406.21	405.02	436.08	419.35	394.27	399.04	387.10	405.02	381.12	399.04	403.23	0.403
8	454.83	427.49	439.26	433.29	441.87	422.72	401.18	419.56	430.39	427.73	429.83	0.430
9	443.25	436.50	432.82	436.61	452.24	447.03	435.09	449.49	443.31	448.09	442.44	0.442
10	436.08	439.67	456.39	434.89	446.83	440.86	424.13	407.41	431.30	444.44	436.20	0.436
11	449.35	436.21	434.97	456.52	468.83	467.40	445.95	446.88	449.35	451.74	450.72	0.451
12	576.02	553.46	548.43	551.00	570.04	566.37	553.42	566.37	569.89	553.20	560.82	0.561
13	438.55	446.86	433.75	455.39	433.86	439.67	422.94	431.30	427.74	436.16	436.62	0.437
14	402.02	403.82	408.60	405.02	406.21	395.46	409.80	401.44	410.99	406.22	404.96	0.405
15	573.48	573.48	544.80	596.18	579.46	606.93	583.05	567.50	587.81	568.85	578.15	0.578
16	479.31	464.12	481.48	440.86	474.75	541.87	524.86	522.02	492.18	482.89	490.43	0.490
17	443.25	431.30	419.36	448.03	468.34	434.95	432.52	448.03	455.20	463.56	444.45	0.444
18	417.72	409.53	388.82	395.06	388.44	420.84	419.91	393.73	402.07	416.84	405.30	0.405
19	422.94	433.73	425.36	430.15	439.77	450.77	433.93	431.54	428.99	434.99	433.22	0.433
20	488.65	476.70	467.15	491.04	506.57	500.60	481.48	473.12	477.90	491.04	485.43	0.485

A. Imágenes



Vista longitudinal de 10 mm de las fibras del intervalo D₃ (0.60-0.79 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm

No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (µm)	PROMEDIO (mm)
1	666.44	673.79	657.71	686.38	686.98	673.87	666.71	682.44	694.85	676.72	676.59	0.677
2	602.25	594.09	598.11	610.81	602.89	600.03	613.95	608.98	593.98	602.85	602.79	0.603
3	694.89	670.72	682.62	693.25	653.74	650.26	684.76	630.46	633.50	652.77	664.70	0.665
4	671.19	647.99	666.78	701.42	652.77	636.05	664.52	647.99	629.75	641.69	656.01	0.656
5	670.29	683.41	673.87	691.37	654.01	682.62	678.03	677.63	686.24	713.66	681.11	0.681
6	699.09	670.25	657.11	661.89	672.64	653.52	665.47	640.38	645.16	626.05	659.16	0.659
7	731.40	723.21	715.47	739.90	752.14	759.63	763.09	758.76	773.01	764.31	748.09	0.748
8	663.51	675.54	667.45	668.05	649.19	648.61	662.79	643.91	659.21	621.36	655.96	0.656
9	739.93	739.66	755.32	747.02	746.07	722.06	735.24	726.97	718.36	729.17	735.98	0.736
10	752.40	745.39	739.67	732.83	731.05	723.29	727.97	719.12	687.21	704.85	726.38	0.726
11	615.67	600.15	626.50	640.00	620.79	624.75	666.94	624.21	621.56	628.98	626.96	0.627
12	669.24	652.54	666.94	659.71	656.16	671.87	686.20	662.02	658.74	664.49	664.79	0.665
13	669.30	659.71	675.45	682.85	672.98	676.98	675.45	682.96	669.95	685.50	675.11	0.675
14	701.31	705.19	706.10	733.58	714.46	679.96	709.68	704.90	709.69	713.55	707.84	0.708
15	655.93	667.55	654.08	667.27	646.67	671.12	649.06	621.93	669.83	666.64	657.01	0.657
16	792.22	778.45	759.29	747.57	726.57	718.66	785.82	775.52	745.02	753.49	758.26	0.758
17	646.59	625.58	632.06	628.15	624.83	615.05	645.44	621.93	617.15	638.81	629.56	0.630
19	769.70	751.15	756.65	788.41	769.70	787.32	781.35	768.80	739.97	751.48	766.45	0.766
20	611.08	633.66	637.44	620.58	625.18	671.87	648.24	672.16	634.44	713.49	646.81	0.647

A. Imágenes



Vista longitudinal de 15 mm de las fibras del intervalo D₁ (0.20-0.39 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 15 mm

No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (μm)	PROMEDIO (mm)
1	314.27	281.34	284.71	284.6	307.24	296.36	283.36	274.88	277.39	292.96	289.71	0.290
2	263.17	217.92	221.42	254.95	248.61	253.29	247.42	249.93	240.05	234.85	243.16	0.243
3	285.16	282.27	272.91	264.26	258.16	264.26	258.16	278.95	296.91	309.17	277.02	0.277
4	290.57	283.36	303.66	264.26	272.78	277.35	267.79	287.10	286.94	258.29	279.21	0.279
5	344.62	357.74	349.03	347.47	337.17	322.95	327.79	339.78	335.89	322.58	338.50	0.339
6	282.05	297.49	284.41	274.79	273.61	266.64	268.88	295.3	280.14	304.07	282.73	0.283
7	325.68	307.06	322.69	315.56	338.37	354.89	317.18	333.51	339.99	339.48	329.44	0.329
8	268.82	272.43	283.18	283.65	315.74	293.12	260.68	263.93	273.45	277.68	279.26	0.279
9	370.8	345.19	367.01	364.33	368.65	379.34	371.72	398.03	377.81	358.93	370.18	0.370
10	245.67	241.7	247.75	246.35	258.53	290.74	319.32	320.69	323.96	344.76	283.94	0.284
11	368.10	357.39	364.33	362.34	342.11	314.23	314.23	333.39	344.55	359.78	346.04	0.346
12	387.19	380.02	389.71	360.91	374.05	387.32	368.08	387.19	375.15	378.73	378.83	0.379
13	359.86	351.42	331.00	310.86	299.09	222.68	227.26	257.21	273.07	317.34	294.97	0.295
14	275.11	279.85	273.12	245.41	251.54	275.63	251.45	294.45	299.46	327.13	277.31	0.277
15	265.36	276.05	272.84	280.93	280.86	280.22	287.3	277.23	259.17	261.66	274.16	0.274
16	361.05	346.64	360.06	370.86	357.87	376.96	366.03	393.48	381.73	388.16	370.28	0.370
17	393.66	398.31	388.44	368.76	363.77	342.53	338.72	352.07	349.16	349.95	364.53	0.365
18	292.91	279.78	301.36	275.00	290.62	282.21	262.98	287.97	252.23	279.94	280.50	0.281
19	295.72	267.29	269.34	266.81	290.95	288.35	288.35	307.98	275.83	281.02	283.16	0.283
20	379.28	358.45	363.2	353.1	339.56	352.85	352.5	351.77	325.46	314.95	349.11	0.349

A. Imágenes



Vista longitudinal de 20 mm de las fibras del intervalo D₁ (0.20-0.39 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

No. MUESTRA	Longitud: 20 mm										PROMEDIO (μm)	PROMEDIO (mm)
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10		
1	204.43	219.95	236.80	224.04	237.15	240.50	209.25	244.48	244.22	245.41	230.62	0.231
2	296.77	304.07	294.38	275.30	318.07	290.44	197.84	289.25	286.86	304.85	285.78	0.286
3	330.99	323.07	317.06	328.95	286.17	298.76	320.87	323.55	286.11	288.49	310.40	0.310
4	274.74	292.11	280.80	273.12	294.76	283.18	278.54	256.79	284.99	282.39	280.14	0.280
5	269.68	269.50	276.05	307.81	294.48	295.67	281.78	293.59	283.07	297.46	286.91	0.287
6	351.84	355.72	375.99	380.53	350.83	361.06	347.76	340.42	342.53	325.68	353.24	0.353
7	284.16	258.86	272.06	283.18	304.23	307.50	286.03	301.61	298.92	302.95	289.95	0.290
8	247.96	259.88	264.91	234.61	250.63	220.66	206.97	207.27	204.47	206.50	230.39	0.230
9	293.19	304.40	303.58	272.61	305.97	301.27	326.27	279.69	250.26	258.34	289.56	0.290
10	202.26	202.42	224.93	234.47	229.97	198.62	226.01	217.44	236.61	233.45	220.62	0.221
11	257.70	214.75	290.36	296.27	287.73	286.99	277.55	275.46	254.65	247.38	268.88	0.269
12	309.50	307.72	299.09	299.46	347.30	326.57	311.12	306.98	315.52	310.10	313.34	0.313
13	337.28	331.05	323.15	350.72	375.20	369.37	370.38	388.07	403.43	377.10	362.58	0.363
14	407.49	402.72	400.42	390.77	378.92	322.95	403.89	411.08	400.54	395.81	391.46	0.391
15	293.50	316.99	296.49	285.67	271.21	290.62	303.99	302.02	298.27	280.00	293.88	0.294
16	246.61	229.92	222.27	218.75	245.67	218.00	266.64	239.91	243.29	228.45	235.95	0.236
17	298.27	313.04	323.30	307.80	327.22	300.18	300.69	300.42	284.70	281.16	303.68	0.304
18	415.98	411.04	421.79	374.02	331.12	377.10	387.83	430.24	403.97	395.48	394.86	0.395
19	312.57	325.34	333.41	322.76	351.50	334.37	312.57	298.10	323.65	291.74	320.60	0.321
20	379.41	354.16	347.47	377.18	353.10	366.54	388.07	379.93	370.93	367.64	368.44	0.368

A. Imágenes



Vista longitudinal de 10 mm de las fibras del intervalo D_3 (0.60-0.79 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

No. MUESTRA	Longitud: 10 mm													PROMEDIO (mm)	PROMEDIO (μm)
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10					
1	612.92	608.18	608.12	616.53	621.77	620.08	628.57	628.45	601.01	612.96	615.86	0.616	615.86		
2	630.46	613.95	620.91	642.22	602.58	619.02	597.25	618.40	630.34	610.81	618.59	0.619	618.59		
3	613.07	602.32	593.81	617.68	563.98	565.11	577.07	622.58	588.05	565.27	590.89	0.591	590.89		
4	804.17	836.36	849.53	874.65	850.99	802.19	725.31	726.40	725.22	709.85	790.47	0.790	790.47		
5	647.56	642.86	663.14	677.84	642.39	669.36	681.47	689.47	672.65	697.78	668.45	0.668	668.45		
6	677.52	647.58	671.45	665.75	623.68	641.83	630.40	629.77	612.18	647.66	644.78	0.645	644.78		
7	649.96	640.97	621.41	645.22	629.64	624.91	633.27	633.27	636.85	616.53	633.20	0.633	633.20		
8	720.55	722.87	715.73	734.28	755.54	772.10	755.24	739.79	748.10	807.47	747.17	0.747	747.17		
9	709.97	681.05	681.31	701.36	685.83	689.47	665.48	660.80	665.65	681.11	682.20	0.682	682.20		
10	593.88	574.88	594.06	625.04	605.01	606.59	616.95	604.60	626.14	613.20	606.04	0.606	606.04		
11	776.58	742.12	750.44	758.70	728.89	718.04	734.77	757.56	753.90	737.44	745.84	0.746	745.84		
12	639.19	629.69	620.08	638.81	615.46	600.50	593.83	604.54	632.05	628.43	620.26	0.620	620.26		
13	666.44	642.02	633.54	661.12	613.10	589.49	592.61	592.61	577.07	601.00	616.90	0.617	616.90		
14	658.31	655.95	666.75	692.97	688.21	680.01	675.30	670.29	663.24	675.05	672.61	0.673	672.61		
15	629.64	650.26	629.82	645.18	643.02	637.16	636.85	629.74	645.97	609.66	635.73	0.636	635.73		
16	621.28	609.34	600.96	623.68	609.35	604.60	615.43	621.36	604.84	607.40	611.82	0.612	611.82		
17	690.61	688.44	666.72	673.94	657.42	637.12	648.76	648.76	660.80	652.34	662.49	0.662	662.49		
18	675.28	667.94	618.07	668.83	676.40	669.06	688.18	685.79	657.32	666.25	667.31	0.667	667.31		
19	801.78	806.46	818.44	827.94	799.64	802.91	830.69	823.35	806.48	826.93	814.46	0.814	814.46		
20	674.69	666.49	664.44	683.78	663.84	660.50	659.34	662.50	658.31	661.43	665.53	0.666	665.53		

A. Imágenes



Vista longitudinal de 10 mm de las fibras del intervalo D₃ (0.60-0.79 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm

No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (µm)	PROMEDIO (mm)
1	720.48	720.65	712.47	733.65	731.23	728.80	745.02	747.02	724.04	715.65	727.901	0.728
2	725.31	683.42	683.42	734.78	673.94	677.47	682.47	709.69	750.49	718.08	703.907	0.704
3	707.37	677.47	681.05	701.31	697.78	702.51	685.80	683.42	666.69	679.94	688.334	0.688
4	689.60	665.71	683.50	713.26	673.84	660.70	617.68	595.01	585.43	599.79	648.452	0.648
5	717.01	721.91	704.91	721.66	713.27	669.11	670.30	694.16	713.26	692.97	701.856	0.702
6	786.32	774.46	781.39	802.96	765.99	749.15	762.43	750.32	744.44	732.44	764.990	0.765
7	633.66	605.67	601.30	613.13	601.30	597.72	609.44	637.29	633.25	628.55	616.131	0.616
8	744.35	725.23	708.58	742.03	750.35	713.28	730.00	725.31	702.55	701.31	724.299	0.724
9	799.28	810.06	780.17	774.40	774.40	804.06	799.32	774.40	774.19	811.32	790.160	0.790
10	691.06	674.04	680.36	713.29	690.79	677.66	695.34	683.42	665.58	683.66	685.520	0.686
11	604.57	605.85	610.54	641.69	604.57	625.31	610.54	623.66	611.74	598.57	613.704	0.614
12	673.84	669.11	673.89	677.66	634.44	610.54	635.72	653.55	671.87	653.66	655.428	0.655
13	689.40	677.42	695.44	719.24	683.39	695.34	701.34	665.50	640.41	660.17	682.765	0.683
14	634.44	646.64	660.17	689.37	677.45	677.52	709.11	719.33	731.40	750.32	689.575	0.690
15	719.33	707.29	659.53	695.34	689.37	695.37	695.34	690.95	659.50	659.74	687.176	0.687
16	732.40	714.46	690.79	720.53	689.39	665.50	671.45	659.50	665.50	665.71	687.523	0.688
17	755.17	725.21	726.50	798.11	780.17	780.19	780.19	771.86	816.07	789.73	772.320	0.772
18	732.60	713.36	725.43	768.22	738.35	701.31	713.29	701.31	731.40	737.16	726.243	0.726
19	882.92	817.20	798.09	807.65	799.33	788.53	798.15	798.11	798.09	792.11	808.018	0.808
20	793.33	786.14	810.04	821.98	774.22	804.06	835.15	857.83	870.99	876.96	823.070	0.823

A. Imágenes



Vista longitudinal de 10 mm de las fibras del intervalo D_1 (0.20-0.39 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm													
No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (µm)	PROMEDIO (mm)	
1	285.16	292.38	269.88	338.17	315.63	302.55	309.13	317.15	306.21	317.02	305.328	0.305	
2	258.53	241.7	251.04	255.03	246.16	242.68	241.63	244.15	254.01	241.58	247.651	0.248	
3	343.10	355.23	360.49	374.11	366.09	344.62	322.76	337.13	329.83	351.27	348.463	0.348	
4	292.72	279.59	276.01	296.36	273.64	285.67	275.23	258.29	271.88	279.88	278.927	0.279	
5	276.00	265.24	246.12	260.45	268.82	268.82	290.36	279.57	277.18	249.70	268.226	0.268	
6	380.20	371.80	363.70	391.88	366.86	375.34	363.40	371.57	387.11	419.38	379.124	0.379	
7	240.57	263.38	258.46	270.46	247.27	253.76	271.07	253.29	282.21	282.69	262.316	0.262	
8	298.92	283.19	287.23	290.57	278.63	302.95	274.92	277.49	280.80	296.91	287.161	0.287	
9	355.42	360.19	338.72	342.92	322.60	322.85	315.42	339.66	314.49	314.40	332.667	0.333	
10	400.35	375.05	401.26	408.42	382.86	392.60	391.65	371.89	371.48	415.07	391.063	0.391	
11	361.32	357.74	357.74	338.53	352.55	329.92	317.39	316.72	320.30	328.66	338.087	0.338	
12	376.34	346.48	339.31	341.70	338.11	344.09	370.37	338.11	357.23	354.84	350.658	0.351	
13	338.22	360.97	359.78	346.64	344.14	341.73	374.28	372.91	365.75	357.87	356.229	0.356	
14	237.92	234.82	222.18	245.66	242.21	233.15	250.95	246.87	244.50	255.22	241.348	0.241	
15	309.45	305.94	295.14	286.78	303.46	296.30	309.44	315.41	296.49	295.11	301.352	0.301	
16	363.36	360.41	339.72	328.82	315.12	317.18	325.34	344.76	339.85	328.07	336.263	0.336	
17	401.95	371.14	392.79	398.88	382.69	401.74	386.26	404.00	375.47	379.56	389.448	0.389	
18	335.38	319.98	311.08	285.97	282.08	290.36	292.83	258.53	242.96	253.42	287.259	0.287	
19	306.53	290.44	310.86	298.97	314.49	299.30	325.15	298.18	319.89	347.66	311.147	0.311	
20	363.14	361.06	339.23	355.81	338.14	353.26	323.65	339.91	323.46	314.60	341.226	0.341	

A. Imágenes



Vista longitudinal de 10 mm de las fibras testigo del intervalo D₁ (0.20-0.39 mm) a 40X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm

No. MUESTRA	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	PROMEDIO (µm)	PROMEDIO (mm)
1	290.34	270.01	277.22	290.44	281.98	270.04	262.94	274.80	264.04	285.55	276.736	0.277
2	333.81	321.08	314.44	350.09	346.55	342.91	341.80	342.99	342.91	341.91	337.849	0.338
3	358.44	346.48	319.00	330.95	319.11	327.37	338.19	347.07	330.37	346.88	336.386	0.336
4	311.86	285.54	277.31	307.11	298.7	306.04	309.44	319.11	322.58	320.25	305.794	0.306
5	331.20	314.22	309.63	322.69	324.98	303.49	297.50	301.13	335.83	352.46	319.313	0.319
6	290.33	249.84	264.08	273.61	245.00	252.14	215.07	206.70	199.54	219.83	241.614	0.242
7	298.80	298.77	317.91	322.00	311.94	308.25	331.02	305.85	319.08	330.94	314.516	0.315
8	285.57	251.00	261.66	249.70	253.36	260.45	264.43	258.08	242.56	247.36	257.417	0.257
9	382.39	359.62	363.23	394.33	363.44	357.33	359.63	374.19	360.88	365.69	368.073	0.368
10	366.79	358.62	387.16	381.15	384.71	370.40	363.20	371.58	366.79	378.73	372.913	0.373
11	334.63	317.91	310.91	329.78	285.54	282.08	282.46	292.71	297.51	253.30	298.683	0.299
12	387.11	363.2	354.87	378.78	359.63	340.51	336.95	335.78	328.55	341.87	352.725	0.353
13	268.82	228.25	236.56	277.19	266.45	247.36	273.64	262.85	238.95	268.83	256.890	0.257
14	290.36	277.49	288.00	295.11	297.53	303.46	309.48	319.00	309.63	326.16	301.622	0.302
15	383.53	375.17	363.23	375.24	359.64	354.87	354.87	391.88	370.37	343.14	367.194	0.367
16	351.50	358.58	371.72	366.79	346.51	346.48	370.37	363.21	344.09	357.23	357.648	0.358
17	268.82	253.29	260.45	286.74	278.38	278.39	284.37	270.01	286.86	254.62	272.193	0.272
18	415.79	378.75	363.20	366.80	334.63	334.53	329.75	339.31	329.75	354.84	354.735	0.355
19	261.67	261.98	290.74	287.93	252.16	238.95	240.14	225.81	222.22	230.59	251.219	0.251
20	358.42	319.00	322.69	342.92	319.00	351.27	346.49	355.08	350.08	350.06	341.501	0.342

ANEXO 4
DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE LAS FIBRAS

En este anexo se muestran las mediciones del área de la sección transversal en fibras del bagazo y fibras testigo, que se realizaron con el Software Axiovision LE Canon Module.

ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL (Fibra de bagazo)

A. Imágenes



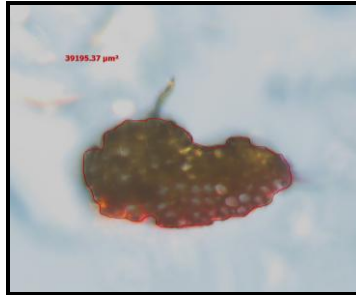
Sección transversal de fibras de los intervalos: a) D₁ (0.20-0.39 mm), b) D₂ (0.40-0.59 mm) y c) D₃ (0.60-0.79 mm) a 100X.

B. Determinación de parámetros

No. PROBETA	Longitud: 10 mm		
	AREA D1 (mm ²)	AREA D2 (mm ²)	AREA D3 (mm ²)
1	0.075	0.150	0.219
2	0.048	0.153	0.210
3	0.076	0.110	0.267
4	0.058	0.153	0.281
5	0.044	0.140	0.232
6	0.057	0.159	0.282
7	0.061	0.157	0.214
8	0.066	0.191	0.202
9	0.074	0.131	0.222
10	0.057	0.159	0.251

ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL (Fibras testigo)

A. Imágenes



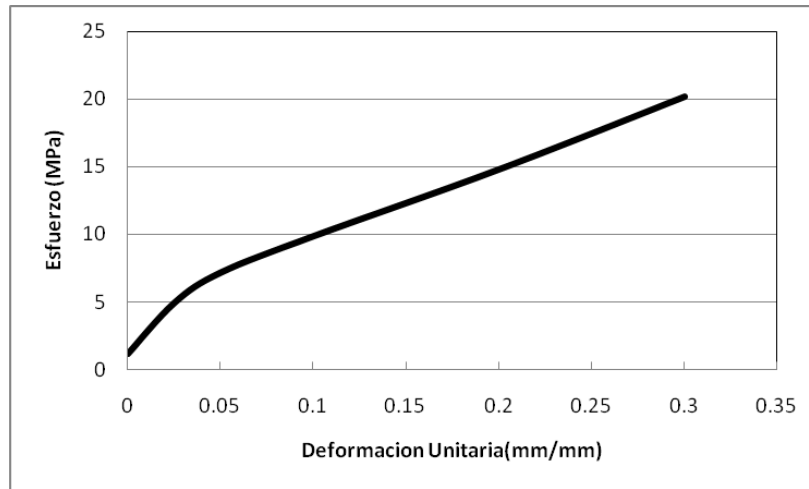
Sección transversal de las fibras testigo a 100X.

B. Determinación de parámetros

Longitud: 10 mm	
No. PROBETA	AREA (mm ²)
1	0.044
2	0.039
3	0.031
4	0.036
5	0.036
6	0.036
7	0.035
8	0.050
9	0.034
10	0.056

ANEXO 5
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN TRES DIÁMETROS

En el apartado siguiente se exponen los valores obtenidos de la resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria; en tres diámetros de fibra en unidades del Sistema Internacional.

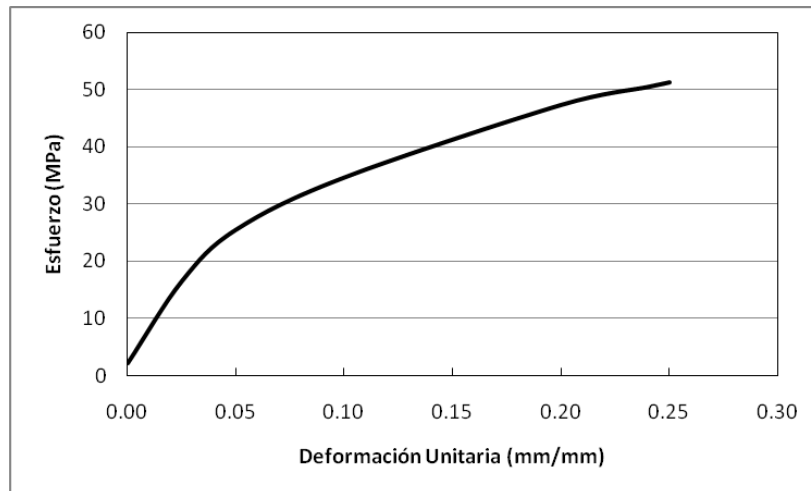
DIÁMETRO 1 (0.20-0.39 mm)**A. Gráfica**

Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

B. Determinación de parámetros

$L_1 = 10 \text{ mm}, v_1 = 5 \text{ mm/min}$			
No. MUESTRA	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU (mm/mm)
1	16.90	0.408	0.266
2	22.00	0.300	0.317
3	22.30	0.328	0.316
4	15.90	0.217	0.177
5	30.70	0.371	0.393
6	22.00	0.167	0.363
7	12.60	0.100	0.191
8	12.50	0.123	0.251
9	5.80	0.044	0.155
10	10.80	0.092	0.355
11	15.70	0.204	0.235
12	9.10	0.116	0.177
13	21.00	0.272	0.247
14	11.10	0.179	0.225
15	16.30	0.204	0.282
16	10.20	0.181	0.151
17	15.50	0.204	0.246
18	5.70	0.104	0.144
19	11.50	0.154	0.237
20	9.00	0.173	0.149

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

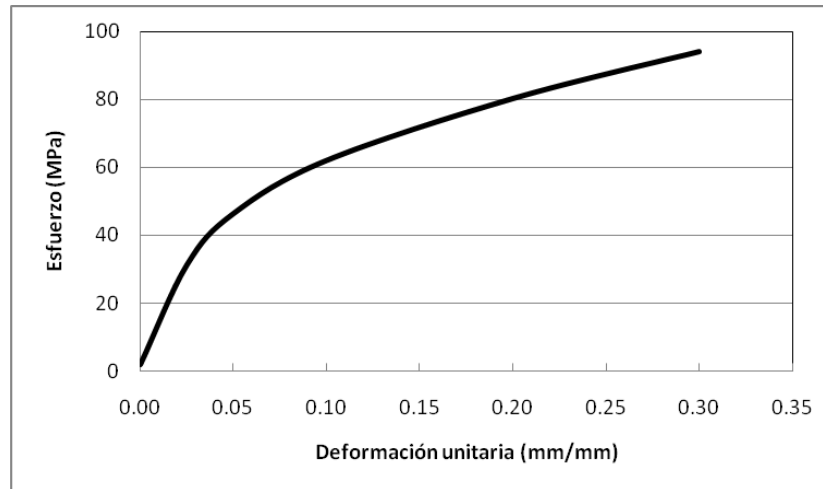
DIÁMETRO 2 (0.40-0.59 mm)**A. Gráfica**

Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

B. Determinación de parámetros

$L_1 = 10 \text{ mm}, v_2 = 5 \text{ mm/min}$			
No. MUESTRA	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU (mm/mm)
1	69.76	0.369	0.230
2	36.80	0.528	0.145
3	28.16	0.396	0.196
4	50.56	0.516	0.320
5	53.44	0.788	0.288
6	66.88	1.044	0.226
7	73.60	0.738	0.326
8	67.20	0.588	0.320
9	49.92	0.638	0.399
10	59.84	0.675	0.261
11	36.48	0.444	0.241
12	46.72	0.750	0.369
13	28.48	0.300	0.162
14	87.36	0.992	0.362
15	46.40	0.700	0.270
16	62.08	0.816	0.183
17	46.40	0.550	0.225
18	37.76	0.538	0.192
19	34.56	0.463	0.249
20	43.52	0.762	0.158

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU.: Deformación unitaria a la rotura.

DIÁMETRO 3 (0.60-0.79 mm)**A. Gráfica**

Curva típica esfuerzo-deformación.

B. Determinación de parámetros

$L_1 = 10 \text{ mm}, v_2 = 5 \text{ mm/min}$			
No. MUESTRA	R U T (MPa)	M E (GPa)	D U (mm/mm)
1	80.50	1.244	0.172
2	63.90	1.042	0.291
3	72.30	1.027	0.290
4	69.50	1.292	0.129
5	145.20	1.654	0.437
6	129.20	1.281	0.368
7	122.40	1.696	0.256
8	104.80	1.115	0.244
9	71.27	1.064	0.180
10	73.00	0.956	0.247
11	75.10	1.329	0.328
12	85.20	0.900	0.216
13	65.30	0.852	0.348
14	48.70	1.235	0.274
15	109.40	1.880	0.256
16	160.10	0.656	0.259
17	48.10	0.877	0.268
18	42.80	1.442	0.079
19	88.40	1.569	0.282
20	75.00	2.159	0.275

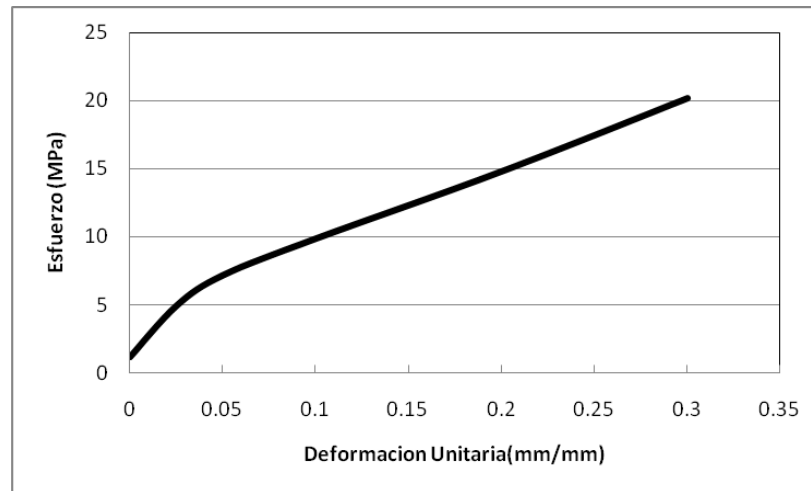
RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU.: Deformación unitaria a la rotura.

ANEXO 6
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN TRES LONGITUDES

En el apartado siguiente se exponen los valores obtenidos de la resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria; en tres longitudes de fibra en unidades del sistema internacional.

LONGITUD 1 (10 mm)

A. Gráfica



Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

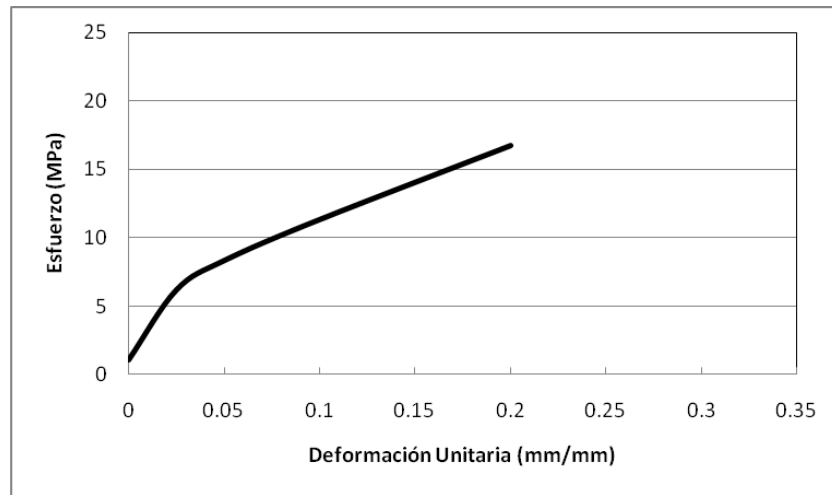
A. Determinación de parámetros

D ₁ = 0.20-0.39 mm, V ₂ = 5 mm/min			
No. MUESTRA	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU (mm/mm)
1	16.90	0.408	0.266
2	22.00	0.300	0.317
3	22.30	0.328	0.316
4	15.90	0.217	0.177
5	30.70	0.371	0.393
6	22.00	0.167	0.363
7	12.60	0.100	0.191
8	12.50	0.123	0.251
9	5.80	0.044	0.155
10	10.80	0.092	0.355
11	15.70	0.204	0.235
12	9.10	0.116	0.177
13	21.00	0.272	0.247
14	11.10	0.179	0.225
15	16.30	0.204	0.282
16	10.20	0.181	0.151
17	15.50	0.204	0.246
18	5.70	0.104	0.144
19	11.50	0.154	0.237
20	9.00	0.173	0.149

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

LONGITUD 2 (15 mm)

A. Gráfica



Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

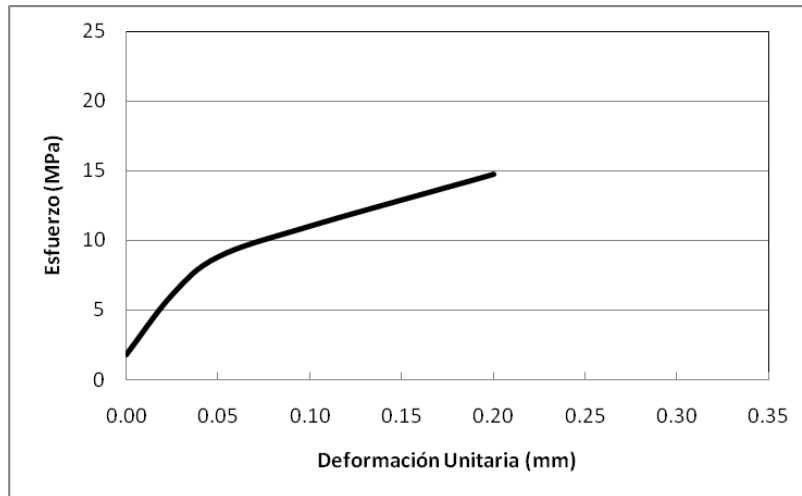
B. Determinación de parámetros

$D_1 = 0.20-0.39 \text{ mm}, v_2 = 5 \text{ mm/min}$				
No. MUESTRA	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU (mm/mm)	
1	10.300	0.201	0.153	
2	6.846	0.169	0.081	
3	14.000	0.223	0.197	
4	7.500	0.143	0.164	
5	14.100	0.312	0.161	
6	9.100	0.129	0.252	
7	29.200	0.381	0.201	
8	6.577	0.124	0.133	
9	20.100	0.296	0.273	
10	9.530	0.279	0.057	
11	15.400	0.320	0.161	
12	22.500	0.353	0.193	
13	18.400	0.296	0.208	
14	21.070	0.300	0.196	
15	19.730	0.357	0.178	
16	10.600	0.150	0.271	
17	11.500	0.171	0.208	
18	11.200	0.238	0.129	
19	19.200	0.258	0.312	
20	18.520	0.246	0.297	

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

LONGITUD 3 (20 mm)

A. Gráfica



Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

B. Determinación de parámetros

D ₁ = 0.20-0.39 mm, V ₂ = 5 mm/min			
No. MUESTRA	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU (mm/mm)
1	8.725	0.218	0.075
2	18.930	0.416	0.098
3	10.740	0.181	0.213
4	8.456	0.205	0.083
5	9.664	0.175	0.129
6	5.235	0.145	0.062
7	8.188	0.170	0.164
8	24.560	0.351	0.127
9	15.440	0.208	0.168
10	15.000	0.332	0.133
11	11.680	0.204	0.153
12	15.900	0.268	0.208
13	21.000	0.286	0.255
14	13.900	0.212	0.197
15	12.000	0.216	0.203
16	13.900	0.212	0.206
17	18.600	0.296	0.184
18	11.500	0.212	0.178
19	19.200	0.261	0.233
20	17.100	0.235	0.233

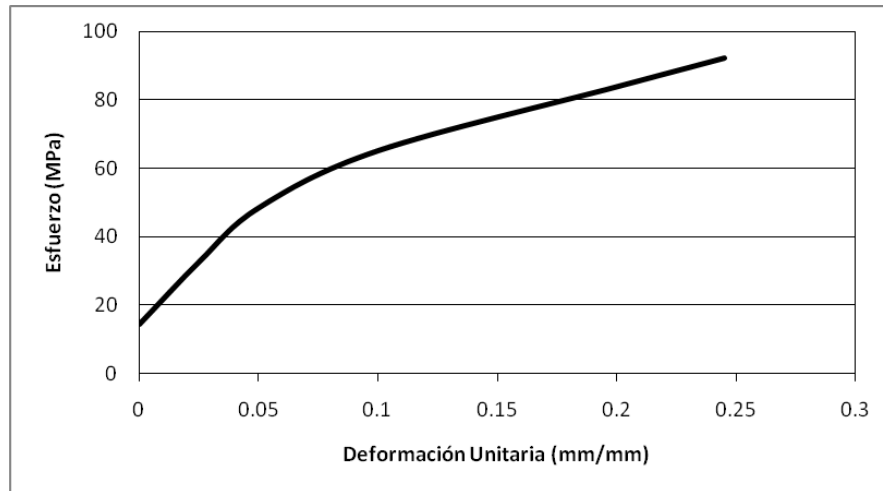
RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

ANEXO 7
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN TRES VELOCIDADES

En el apartado siguiente se exponen los valores obtenidos de la resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria; en tres velocidades de deformación en unidades del sistema internacional.

VELOCIDAD 1 (1 mm/min)

A. Gráfica

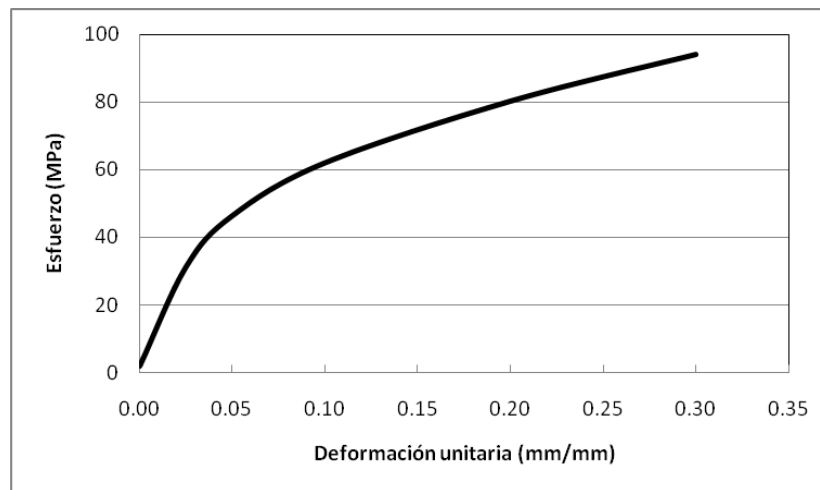


Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

B. Determinación de parámetros

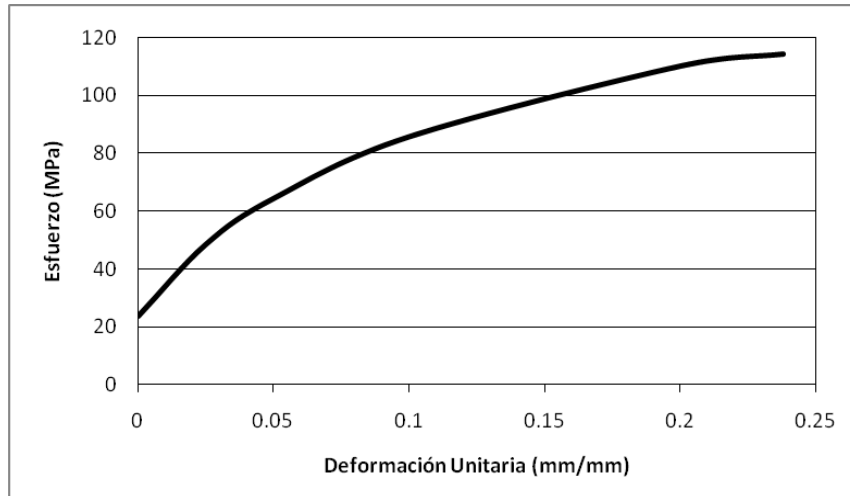
D ₃ = 0.60-0.79 mm, L ₁ = 10 mm			
No. MUESTRA	RUT (MPa)	ME (GPa)	DU (mm/mm)
1	68.700	0.676	0.393
2	63.700	1.416	0.077
3	79.000	1.332	0.150
4	89.200	1.064	0.385
5	118.900	1.612	0.286
6	58.000	0.912	0.101
7	110.100	1.3	0.252
8	82.300	1.496	0.116
9	77.450	1.192	0.296
10	151.100	1.82	0.268
11	98.000	1.76	0.277
12	77.700	0.972	0.337
13	55.200	0.768	0.319
14	84.400	1.268	0.211
15	76.200	1.068	0.219
16	124.900	1.708	0.279
17	111.900	1.416	0.293
18	74.100	1.16	0.172
19	89.700	0.308	89.700
20	104.700	0.146	104.700

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

VELOCIDAD 2 (5 mm/min)**A. Gráfica****B. Determinación de parámetros**

$D_3 = 0.60-0.79 \text{ mm}, L_1 = 10 \text{ mm}$			
No. MUESTRA	R U T (MPa)	M E (GPa)	D U (mm/mm)
1	80.50	1.244	0.172
2	63.90	1.042	0.291
3	72.30	1.027	0.290
4	69.50	1.292	0.129
5	145.20	1.654	0.437
6	129.20	1.281	0.368
7	122.40	1.696	0.256
8	104.80	1.115	0.244
9	71.27	1.064	0.180
10	73.00	0.956	0.247
11	75.10	1.329	0.328
12	85.20	0.900	0.216
13	65.30	0.852	0.348
14	48.70	1.235	0.274
15	109.40	1.880	0.256
16	160.10	0.656	0.259
17	48.10	0.877	0.268
18	42.80	1.442	0.079
19	88.40	1.569	0.282
20	75.00	2.159	0.275

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

VELOCIDAD 3 (50 mm/min)**A. Gráfica**

Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

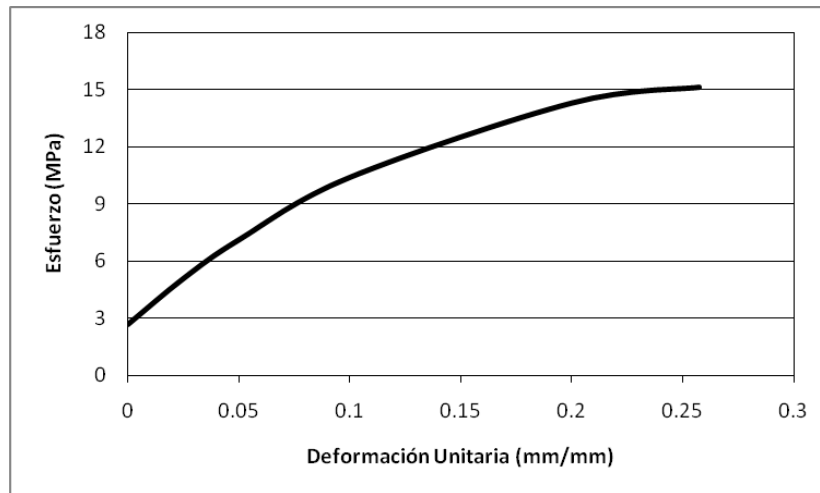
B. Determinación de parámetros

$D_3 = 0.60-0.79 \text{ mm}, L_1 = 10 \text{ mm}$			
No.	RUT	ME	DU
MUESTRA	(MPa)	(GPa)	(mm/mm)
1	74.500	1.569	0.253
2	73.300	2.319	0.076
3	125.100	1.867	0.421
4	131.700	3.233	0.247
5	173.200	1.352	0.233
6	117.000	1.237	0.141
7	116.100	-	0.234
8	144.600	-	0.335
9	142.800	-	0.234
10	114.400	-	0.295
11	192.500	-	0.261
12	104.200	-	0.152
13	193.000	-	0.169
14	117.900	-	0.338
15	76.100	-	0.181
16	71.400	-	0.197
17	91.270	-	0.177
18	77.300	-	0.189
19	96.800	-	0.508
20	53.000	-	0.114

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

ANEXO 8
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN DOS TIPOS DE FIBRA

En el apartado siguiente se exponen los valores obtenidos de la resistencia última a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria; en fibras de bagazo y fibras testigo y en unidades del Sistema Internacional.

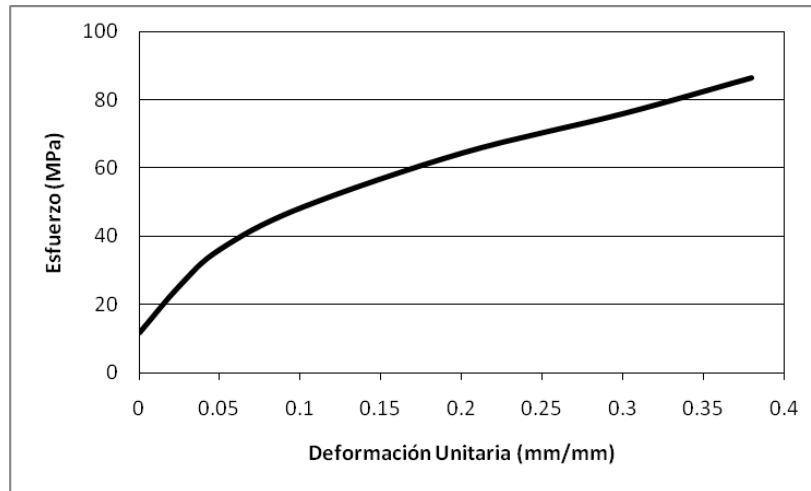
FIBRA DE BAGAZO**A. Gráfica**

Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

A. Determinación de parámetros

$L_1 = 10 \text{ mm}$, $D_1 = 0.20\text{-}0.39 \text{ mm}$, $v_2 = 5 \text{ mm/min}$			
No.	R U T	M E	D U
MUESTRA	(MPa)	(GPa)	(mm/mm)
1	16.900	0.204	0.237
2	13.100	0.152	0.332
3	10.800	0.192	0.172
4	15.000	0.172	0.385
5	28.000	0.328	0.364
6	16.400	0.240	0.284
7	8.700	0.176	0.111
8	19.700	0.220	0.446
9	11.800	0.148	0.194
10	14.700	0.188	0.282
11	19.200	0.236	0.222
12	14.100	0.204	0.219
13	15.900	0.216	0.311
14	13.150	0.188	0.186
15	18.700	0.264	0.269
16	11.900	0.176	0.275
17	15.800	0.152	0.220
18	14.000	0.216	0.149
19	8.700	0.176	0.081
20	16.100	0.204	0.406

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

FIBRA TESTIGO**A. Gráfica**

Curva típica esfuerzo-deformación unitaria.

A. Determinación de parámetros

$L_1 = 10 \text{ mm}, D_1 = 0.20\text{-}0.39 \text{ mm}, v_2 = 5 \text{ mm/min}$			
No.	R U T	M E	D U
MUESTRA	(MPa)	(GPa)	(mm/mm)
1	57.500	0.608	0.569
2	134.300	1.084	0.476
3	141.400	1.628	0.390
4	113.300	1.204	0.624
5	82.800	1.140	0.271
6	42.600	0.532	0.394
7	144.700	1.856	0.335
8	89.500	1.220	0.309
9	106.800	1.204	0.364
10	95.900	1.540	0.280
11	86.000	1.048	0.309
12	101.900	1.360	0.404
13	66.600	0.876	0.258
14	59.800	0.640	0.429
15	64.400	0.680	0.330
16	53.900	0.736	0.264
17	94.900	1.144	0.291
18	48.500	0.568	0.436
19	61.300	0.672	0.390
20	84.000	0.812	0.491

RUT: Resistencia última a la tensión, ME: Módulo de elasticidad, DU: Deformación unitaria a la rotura.

ANEXO 9
PARTICIPACIÓN EN EVENTOS INTERNACIONALES Y NACIONALES DERIVADOS DEL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

En este apartado se anexan las constancias de participación en eventos internacionales y nacionales para difundir los resultados del estudio.



Sociedad Mexicana de Materiales A.C.

August 2008

MESA DIRECTIVA

DR. JUAN MENDEZ NONELL
PRESIDENTE

DR. ROMEO DE COSS
VICEPRESIDENTE

DR. ENRIQUE SANZOS CUEVAS
SECRETARIO

DR. JORGE LÓPEZ CUEVAS
TESORERO

DR. LUIS FUENTES COBAS
VOCAL REGIÓN NORTE

DR. JESÚS BARRETO
VOCAL REGIÓN OCCIDENTE

DRA. INÉS REICH
VOCAL REGIÓN SUR

DR. GERARDO MARTÍNEZ
VOCAL REGIÓN CENTRO

DR. ARMANDO SALINAS
VOCAL REGIÓN ORIENTE

DRA. OLIVIA GRAEVE
VOCAL ESTADOS UNIDOS

TO WHOM IT MAY CONCERN

This is to confirm that **Carlos Cortes-Martínez, Isai López-Hernández, Armando José-José, Rey Fernando García-Méndez, José Luis Montes-Bernabé** presented the contribution:

EXTRACTION, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE FIBERS OF AGAVE ANGUSTIFOLIA HAW WASTE PULP

In the **Materials Characterization** Symposium at the XVII International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico.

Sincerely,

DR. JUAN MÉNDEZ NONELL
President





14 del 1 al 5 de diciembre de 2008
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

El Comité Organizador
de la XIV Convención Científica
de Ingeniería y Arquitectura
otorga el presente

CERTIFICADO

Ponente

a: *M. Caballero; L. Silva; C.I. Cortés*

Por la presentación del trabajo titulado:

***Propiedades físicas y mecánicas de las fibras del bagazo
de agave Angustifolia Haw***

En el marco del:

***IV Simposio sobre fibras naturales, aprovechamiento
integral y aplicaciones (FIBRATEC 2008)***

44
ANIVERSARIO
cujae
2 0 0 8

Dr. Gustavo Cobreiro Suárez
Presidente del Comité Organizador
Rector del Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría
La Habana, Cuba



La Asociación Mexicana de Ingeniería Agrícola Y la Universidad Autónoma Chapingo



Otorgan el presente

Diploma

A los C. Magdaleno Caballero Caballero
Luis Silva Santos
Carlos Inocencio Cortés Martínez
Isaí López Hernández
José José Armando
Montes Bernabé Jose Luis
Rey Fernando García Méndez

En reconocimiento por su participación con la conferencia:
**"METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN VOLUMÉTRICA DEL BAGAZO RESIDUAL EN LA
INDUSTRIA MEZCALERA DEL ESTADO DE OAXACA"**,
del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, celebrado los días 24,25 y 26 de septiembre de 2008.





CONGRESO NACIONAL ESTUDIANTIL
DE INVESTIGACIÓN
Y 5^{to} CONGRESO DE INVESTIGACIÓN
POLITÉCNICA

Otorga la presente
CONSTANCIA

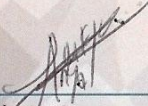
à

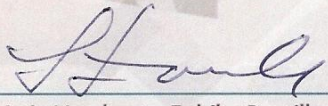
CARLOS INOCENCIO CORTÉS MARTÍNEZ, MAGDALENO CABALLERO CABALLERO, LUIS SILVA
SANTOS

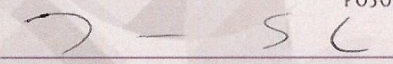
Por la presentación del trabajo titulado ENSAYOS A TENSIÓN EN FIBRAS DEL BAGAZO DEL Agave
angustifolia Haw en la modalidad de *Presentación Oral* del área Ingeniería y Ciencias Físico-
Matemáticas en el 5to Congreso Nacional Estudiantil de Investigación y 5to Congreso de Investigación
Politécnica los días 28, 29 y 30 de octubre del 2009 en la Ciudad de Querétaro, Oro.

“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”




Ing. Angel M. Figueroa Hernandez
COMITÉ ORGANIZADOR


Dr. Luis Humberto Fabila Castillo
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y
POSGRADO DEL IPN


Dr. Joaquín Salas Rodríguez
DIRECTOR CICATA-ORO.





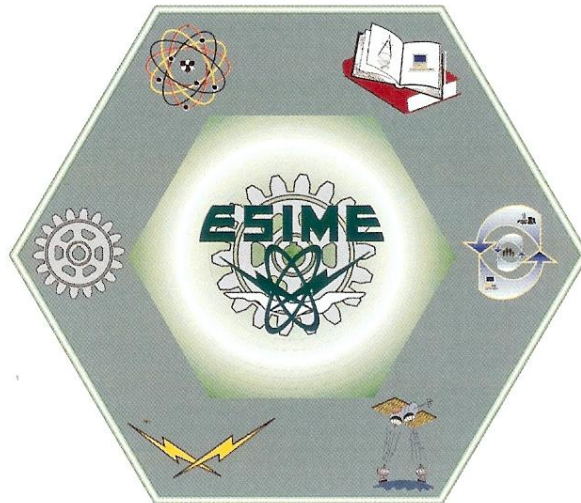
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**XI CONGRESO NACIONAL
DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS
del 09 – 13 de noviembre de 2009**

Otorga el presente

DIPLOMA



A

CORTES M. CARLOS INOCENCIO

**POR SU PARTICIPACIÓN CON LA PONENCIA
COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN DE LAS FIBRAS DEL BAGAZO DE
AGAVE ANGUSTIFOLIA HAW**

DR. JAIME ROBLES GARCÍA
Jefe de la Sección de Estudios de
Posgrado e Investigación de la ESIME

M. EN C. JESÚS REYES GARCÍA
Director de la ESIME Unidad Zacatenco



Instituto Welte para Estudios Oaxaqueños

Emilio Carranza 203 • Colonia Reforma • Oaxaca, Oaxaca 68060

Tel/Fax: (961) 613-8323

E-mail: welte@prodigy.net.mx • Red mundial: <http://www.welte.org>

CONSTANCIA

Por este conducto se hace constar que

CORTÉS MARTÍNEZ, Carlos Inocencio

Presentó la ponencia:

CABALLERO CABALLERO, Magdaleno, Luis SILVA SANTOS y Carlos Inocencio CORTÉS MARTÍNEZ. (CIDIIR-Oaxaca). Propiedades Físicas y Mecánicas de las Fibras del Bagazo de *Agave Angustifolia* Haw

en el

**OCTAVO SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS OAXAQUEÑOS,
25-27 de Junio, 2009**

Se extiende la presente constancia el día veintisiete del mes de Junio del 2009, para los fines que al interesado convengan.

Dr. Ronald Waterbury, Secretario
Instituto Welte para Estudios Oaxaqueños



Instituto Politécnico Nacional

Centro Interdisciplinario de Investigación para
el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: ISAI LÓPEZ HERNÁNDEZ, PLACIDO MARTÍNEZ NÚÑES, JOSÉ LUIS MONTES
BERNABÉ, REY FERNANDO GARCÍA MENDEZ Y CARLOS INOCENCIO CORTÉS

Por su brillante exposición con la conferencia

“El maguey no sólo es mezcal”

Impartida el 11 de septiembre de 2008 en el Planetario NUNDEHUI
dentro del Marco del 25 aniversario del CIIDIR Oaxaca.



Santa Cruz Xocotlán, Oax. 23 de septiembre de 2008

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Director