

Efecto de la longitud en las propiedades mecánicas a tracción de hilos formados por
fibras extraídas de la hoja de piña de Lebrija, Santander

Tania Yuliana Álvarez Rincón y Jhoan Camilo Castellanos Diaz

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Dr. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector

Germán Adolfo Diaz Ramírez

Dr. en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres Julio y Marina, motores de mi vida, cuya dedicación y sacrificio hicieron posible que alcanzara mis sueños. Por enseñarme a través del ejemplo que a pesar de los tropiezos me puedo levantar más fuerte.

A mis hermanos Miguel y Julián, compañeros de vida y de sueños, por ser mis mayores admiradores y alegrarse de mis éxitos a pesar de la distancia.

A mis amigos de la carrera Camilo C, Camila P, Sergio I, Nathalia Q y Nathalia A, por su constante apoyo, motivación y valiosa compañía que me brindaron tanto en lo personal como en lo académico.

A mis amigas de la selección de fútbol, Alejandra Gómez, Geydi Salazar y Jimena Sanabria, por ser mi refugio y compañía en los días soleados como en los grises. En ellas encontré las hermanitas que nunca tuve, y su amistad ha hecho este camino más significativo.

Tania Yuliana Álvarez Rincón

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres y a mi hermano, quienes han sido mi principal fuente de inspiración y motivación para perseguir mis sueños. Gracias por brindarme su apoyo incondicional y por estar a mi lado en cada paso de esta importante etapa de mi vida.

A mi pareja, Camila, por ser mi compañera en este camino y un pilar fundamental en la consecución de cada uno de mis logros. Gracias por acompañarme en los días buenos y malos, por ser mi gran apoyo emocional y por creer siempre en mí.

A mis amigos Tania, Nathalia Q., Nathalia A. y Sergio, quienes fueron parte esencial en mi crecimiento académico y profesional, su amistad y apoyo fueron fundamentales para este proceso.

Jhoan Camilo Castellanos Diaz

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director, el Dr. José Miguel Benjumea Royero, y codirector, el Dr. Germán Adolfo Díaz Ramírez, cuya guía y experiencia fueron esenciales en cada etapa de este trabajo. Su apoyo, orientaciones y compromiso nos permitieron alcanzar los objetivos de este proyecto de la mejor manera.

A la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) por facilitar los servicios de microscopía y al laboratorista Víctor Cuellar por su disposición para brindar el soporte técnico necesario.

Al laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica UIS y a su auxiliar, Juliana, por su acompañamiento constante.

Finalmente, extendemos nuestra gratitud al proyecto VIE 3954 por el respaldo económico que hizo posible la realización de esta investigación, sin el cual los resultados alcanzados no habrían sido posibles.

Tania Yuliana Alvarez Rincón & Jhoan Camilo Castellanos Diaz

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. Marcos de Referencia	18
2.1 Marco Conceptual	18
2.2 Estado del Arte	23
2.3 Marco Teórico	26
3. Metodología	29
3.1 Compra y selección de materia prima	29
3.2 Determinación del área de la sección transversal del hilo de fibra de piña	32
3.2.1 Fabricación de probetas para microscopía	32
3.2.2 Procesamiento digital de imágenes SEM (Scanning Electron Microscopic)	34
3.2.2.1 Determinación del umbral de intensidades. Para determinar este umbral, se realizaron iteraciones usando el segundo código del cálculo de área. Cada iteración toma como umbral uno de los parámetros determinados con el primer código (mediana, media, media \pm SD).	37
3.3 Fabricación de probetas y ejecución de ensayos mecánicos	39
3.3.1 Fabricación de probetas para ensayos a tracción	39
3.3.2 Ejecución de ensayos	43
3.4 Determinación de las propiedades	44

3.4.1 Cálculo de esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación unitaria máxima (ϵ_{max})	44
3.4.2 Cálculo del módulo de elasticidad (E).....	46
3.4.3 Cálculo de módulo de tenacidad.....	47
4. Resultados.....	48
4.1 Área de la sección transversal de los hilos de fibra de piña.....	48
4.2 Propiedades mecánicas a tracción del hilo.....	48
4.2.1 Esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación unitaria máxima (ϵ_{max}).....	48
4.2.2 Módulo de elasticidad (E).....	49
4.2.3 Módulo de tenacidad (Ut).....	52
4.3 Relación entre las propiedades mecánicas y la longitud del hilo.....	53
5. Conclusiones.....	57
6. Recomendaciones	58
Referencias Bibliográficas.....	59
Apéndices.....	68

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: <i>Propiedades mecánicas fibras naturales</i>	24
Tabla 2: <i>Propiedades mecánicas de la fibra de piña</i>	25
Tabla 3 <i>Resultados de área sección transversal</i>	48
Tabla 4 <i>Resumen de resultados de propiedades mecánicas</i>	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Clasificación de las fibras vegetales</i>	19
Figura 2 <i>Estructura de la fibra</i>	20
Figura 3 <i>Hilo formado por fibra de hoja de piña</i>	21
Figura 4 <i>Curva esfuerzo vs deformación</i>	22
Figura 5 <i>Libra de hilo artesanal de hoja de piña</i>	29
Figura 6 <i>Pesaje de hilos en balanza</i>	30
Figura 7 <i>Distribución de ajuste de densidad lineal de hilos</i>	31
Figura 8 <i>Histograma y Distribución GAMMA de densidad lineal de hilos</i>	32
Figura 9 <i>Preparación de probetas para determinar</i>	33
Figura 10 <i>Preparación de probetas para determinar área</i>	34
Figura 11 <i>Formato de micrografía</i>	35
Figura 12 <i>Micrografía binarizada</i>	36
Figura 13 <i>Ejemplo de histograma de intensidades</i>	37
Figura 14 <i>Zoom del histograma ejemplo en la zona de intersección distribuciones de intensidades</i>	38
Figura 15 <i>Comparación entre umbrales y áreas</i>	38
Figura 16 <i>Microscopias de un hilo</i>	40
Figura 17 <i>Materiales para fabricación probetas ensayos de tracción</i>	41
Figura 18 <i>Sujeción de los hilos</i>	41
Figura 19 <i>Fabricación de probetas para ensayos de tracción</i>	42
Figura 20 <i>Montaje ensayos de tracción</i>	44

Figura 21 <i>Curvas esfuerzo vs deformación unitaria</i>	46
Figura 22 <i>Bilinealidad curva esfuerzo vs deformación unitaria</i>	47
Figura 23 <i>Curva σ vs ε para hilos de $L= 100$ mm</i>	51
Figura 24 <i>Curva σ vs ε para hilos de $L = 175$ mm</i>	51
Figura 25 <i>Curva σ vs ε para hilos de $L = 250$ mm</i>	52
Figura 26 <i>Relación entre σ_{max} y longitud del hilo.</i>	54
Figura 27 <i>Relación entre ε_{max} y longitud del hilo.</i>	54
Figura 28 <i>Relación entre $E_{(0-20\%)}$ y longitud del hilo</i>	55
Figura 29 <i>Relación entre $E_{(20-80\%)}$ y longitud del hilo</i>	55
Figura 30 <i>Relación entre U_t y longitud del hilo</i>	56
Figura 31 <i>Clasificación de las hojas de piña</i>	56

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Micrografías tomadas a los 48 hilos encapsulados.....	68
Apéndice B. Código empleado para análisis de intensidades.....	71
Apéndice C. Código empleado para cálculo de áreas.....	72
Apéndice D. Umbrales para el cálculo de área.....	74
Apéndice E. Micrografías binarizadas con cada umbral	75
Apéndice F. Valores de área para cada sección de hilo en mm.	82
Apéndice G. Valores propiedades mecánicas para cada probeta.....	84

Resumen

Título: Efecto de la longitud en las propiedades mecánicas a tracción de hilos formados por fibras extraídas de la hoja de piña de Lebrija, Santander *

Autor: Tania Yuliana Alvarez Rincón, Jhoan Camilo Castellanos Diaz**

Palabras Clave: Propiedades Fisicomecánicas, Hilos, Fibra de hoja de piña, Microscopia electrónica de barrido.

Descripción: Las hojas de la planta de piña, de carácter fibroso, son consideradas desechos de cultivo y típicamente son quemadas, generando así afectaciones ambientales; además, son aglomeradas hasta su descomposición, atrayendo insectos que generan enfermedades para el entorno. Las fibras extraídas de esta hoja tienen una estructura y composición compleja, pero su rigidez y resistencia axial han despertado el interés por su potencial aplicación como refuerzo de compuestos. En este trabajo se determinó la influencia de la longitud de los hilos de fibra de piña fabricados artesanalmente en sus propiedades mecánicas a tracción. Estos hilos fueron extraídos de hojas de piña cultivadas en el municipio de Lebrija, Santander. Para ello, se ensayaron 20 probetas a tracción con tres longitudes calibradas (100, 175 y 250 mm) bajo una velocidad de deformación de 20 mm/min. El área de la sección transversal de los hilos se calculó a partir de micrografías obtenidas mediante SEM a 48 secciones transversales de hilos seleccionados aleatoriamente. Los resultados obtenidos mostraron que el área promedio de la sección transversal de los hilos es de 0.675 ± 0.162 mm² y su densidad lineal es aproximadamente 818 tex. Por otra parte, la resistencia, el módulo de elasticidad, módulo de tenacidad y deformación unitaria máxima oscilaron entre 61,25 y 244,23 MPa, 1.37 y 6.86 GPa, 0.95 y 5.48 MPa, 2.71 y 5,54 % respectivamente. Por otro lado, se observaron disminuciones aproximadas del 26.23 % en sus resistencias, 17.94 % en su módulo de elasticidad, 43.51 % en su módulo de tenacidad y 8.02 % en sus deformaciones unitarias máximas al incrementar la longitud de ensayo. La reducción en estos parámetros mecánicos está asociada con una mayor presencia de zonas amorfas y de irregularidades a medida que se incrementa la longitud.

* Efecto de la longitud en las propiedades mecánicas a tracción de hilos formados por fibras extraídas de la hoja de piña de Lebrija, Santander

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Dr. en Ingeniería Civil y Ambiental. Codirector: Germán Adolfo Díaz Ramírez. Dr. en Ingeniería de Materiales.

Abstract

Title: Length effect of on tensile mechanical properties of yarns formed by fibers extracted from pineapple leaf of Lebrija, Santander*

Author(s): Tania Yuliana Alvarez Rincón, Jhoan Camilo Castellanos Diaz**

Key Words: Mechanical properties, yarns, pineapple leaf fiber, Scanning electron microscopic (SEM)

Description: The pineapple plant leaves, which have a fibrous nature, are considered farming waste and are typically burned, causing environmental impacts; in addition, they are agglomerated until they decompose, attracting insects that generate diseases for its surroundings. The fibers extracted from this leaf have a complex structure and composition, but their rigidity and axial strength have aroused interest in the potential application they have as reinforcement for composites. In this paper, the influence of the length of the handmade pineapple fiber yarns on their mechanical tensile properties was determined. These yarns were extracted from pineapple leaves grown in the municipality of Lebrija, Santander. To execute this, 20 tensile test specimens with three calibrated lengths (100, 175 and 250 mm) were tested under a strain rate of 20 mm/min. The cross-sectional area of the yarns was calculated through micrographs obtained from SEM for 48 randomly selected yarn cross-sections. The results achieved showed that the average cross-sectional area of the yarns is $0.675 \pm 0.162 \text{ mm}^2$ and their linear density is approximately 818 tex. On the other hand, the strength, elastic modulus, toughness modulus and maximum unitary strain ranged from 61.25 to 244.23 MPa, 1.37 to 6.86 GPa, 0.95 to 5.48 MPa, 2.71 and 5.54 % respectively. Otherwise, approximate decreases of 26.23 % in their strengths, 17.94 % in their elasticity modulus, 43.51 % in their toughness modulus and 8.02 % in their maximum unitary deformation were observed as the test length was increased. The reduction in these mechanical parameters is associated with a greater presence of amorphous zones and irregularities as the length increases.

* Length effect of on tensile mechanical properties of yarns formed by fibers extracted from pineapple leaf of Lebrija, Santander

** Faculty of Mechanical Physics Engineering. School of Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero. PhD in Civil and Environmental Engineering. Codirector: Germán Adolfo Diaz Ramírez. PhD in Materials Engineering.

Introducción

Las fibras naturales son usadas tradicionalmente en la elaboración de productos como sogas, cordeles, sacos y alfombras, sin embargo, se han empezado a emplear en materiales de embalaje, construcción y mobiliarios (FAO, n.d.). Además, la popularización de las fibras naturales en industrias como la automotriz o la ingenieril ha promovido la sustitución de las fibras sintéticas que utilizan insumos insostenibles (Vinod & Sudev, 2022). De esta manera, se contribuye al cumplimiento de algunos de los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la ONU, en lo relacionado con (9) la industria, innovación e infraestructura; (11) ciudades y comunidades sostenibles y (13) la acción por el clima (ONU, n.d.).

Algunas de las fibras naturales encuentran su origen en productos vegetales, puesto que son extraídas de diversas partes de la planta. Por ejemplo, el algodón y la ceiba provienen de la semilla, mientras que las fibras de fique y de piña son extraídas de las hojas de la planta. Estas últimas se consideraban desechos, por lo que eran quemadas o aglomeradas, generando afectaciones ambientales (Kasim et al., 2016), (Yusof et al., 2015). Según la FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Statistics) en los últimos cinco años, estos desechos se concentran en un aproximado de 5.7 millones de hectáreas a nivel mundial (FAOSTAT, n.d.). De ahí que, según una perspectiva de aprovechamiento de estos materiales y lucha contra el cambio climático, países como India y Tailandia hayan tomado acciones que los ha convertido en pioneros de la reutilización de los residuos de hoja de piña como materia prima en la extracción de fibras naturales.

En los últimos años, se ha estudiado el uso de fibras naturales como sustitutos de las fibras sintéticas en el reforzamiento de materiales compuestos de matriz polimérica. Por ejemplo, Saha et al. (2021) encontraron que al añadir 30 % de PALF (Pineapple Leaf Fiber) de longitud $L = 200$ mm junto con un 7.5 % de nanopartículas de PALF a una matriz epóxica, se obtuvo un incremento en la resistencia a la tracción (43.55 %) y en el módulo de elasticidad (38.64 %) frente al polímero virgen (Saha et al., 2021).

Los incrementos de dichas propiedades en los compuestos reforzados con PALF indican que las fibras tienen un comportamiento mecánico aceptable. En Colombia, autores como Penagos Santana (2021), Hidalgo Salazar & Betancourt Sánchez (2017) y Martínez Suárez et al. (2021) han reportado para estas fibras valores de resistencia a la tracción que varían entre 129 y 486 MPa, y módulos de elasticidad cercanos a 8 GPa. De igual modo, en países como Brasil y Malasia se han registrado amplios rangos para estas propiedades. En Brasil, se han registrado resistencias a la tracción que varían entre 212 y 1309 MPa, y módulos de elasticidad entre 37.39 y 52.12 GPa (Sena Neto et al., 2013), (Sena Neto et al., 2015). En Malasia, los valores oscilan entre 98 y 393 MPa para la resistencia a la tracción, y los módulos de elasticidad se encuentran en un rango de 9.04 a 18.93 GPa (Yusof et al., 2015), (Sia et al., 2021), (Todkar & Patil, 2019), (Rizal & Hamdan, 2021). Estos amplios rangos reflejan la variabilidad de dichas propiedades asociada a las diferencias regionales, condiciones de cultivo, los métodos de extracción y la variabilidad inherente en la estructura interna a lo largo de las fibras, tanto en sección transversal como en las proporciones de sus componentes químicos (Alves Fidelis et al., 2013), (Glória et al., 2015).

Componentes como la celulosa pueden variar a lo largo de la fibra de hoja de piña, lo que puede alterar sus propiedades mecánicas a tracción (Anand et al., 2022a). Lo anterior no es una característica única de la fibra de hoja de piña, en las fibras naturales vegetales se presentan

regiones amorfas y cristalinas de celulosa puesto que esta tiene una estructura desordenada, donde una región cristalina puede presentar rigidez a tracción hasta 15 veces mayor que una zona amorfa (Esguerra & Forero, 2020). Estas características de no uniformidad celulósica influyen en que el diámetro de una fibra sea variable a través de esta. En un estudio realizado por Besserer et al. (n.d) se midió el diámetro de una fibra de hoja de piña en 10 regiones diferentes, encontrando valores que variaban entre 0.10 y 0.28 mm.

Estas condiciones de no uniformidad influyen en las propiedades mecánicas de las fibras, puesto que variar la longitud de estudio puede alterar sus valores. Por ejemplo, Tomczak et al. (2007) encontraron que, al aumentar de 5 a 25 mm la longitud de calibre (L) en una fibra de curauá el esfuerzo máximo de tensión disminuyó un 22 %. Además, basándose en diferentes autores que estudiaron las fibras de coco, Madueke et al. (2023) propusieron la ecuación $\sigma_L = \sigma_0 + \alpha \ln(L/L_0)$, para predecir como la variable L influye en la resistencia de fibras naturales, donde, α representa la frecuencia de aparición de zonas amorfas en la longitud de calibre y σ_0 , es la resistencia de una longitud inicial (L_0) previamente conocida o calculada experimentalmente.

En consecuencia, el objetivo general de este trabajo es determinar las propiedades mecánicas a tracción, según la variación de la longitud de los hilos formados por fibras extraídas de la hoja de piña. Esto cobra especial importancia en el ámbito de la capital piñera de Colombia (Lebrija, Santander), pues abriría la posibilidad de aprovechamiento de estos residuos en la zona, aún más cuando el 41 % del área cosechada de esta fruta en Colombia pertenece a Lebrija, Santander (Datos Abiertos, 2022). Para lograrlo se plantearon los siguientes objetivos específicos: (i) determinar el área de la sección transversal de los hilos, (ii) evaluar sus propiedades mecánicas a tracción y (iii) analizar la relación entre las longitudes de los hilos y sus propiedades mecánicas.

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se detalla la metodología empleada para la fabricación de probetas y ejecución de ensayos. En la sección 3 se muestran y analizan los resultados obtenidos y finalmente en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar la influencia de la longitud de los hilos de fibras extraídas de la hoja de piña de Lebrija, Santander, en sus propiedades mecánicas a tracción.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar el área de la sección transversal de los hilos mediante tratamiento digital de imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido.

Determinar el esfuerzo máximo, módulo de elasticidad y deformación unitaria máxima a tracción de los hilos a partir de los resultados experimentales.

Identificar la relación entre las propiedades mecánicas a tracción de hilos y las longitudes empleadas.

2. Marcos de Referencia

Este apartado presenta la siguiente secuencia. En primera instancia, se encuentra el marco conceptual el cual va a permitir al lector de este trabajo de investigación relacionarse con el objeto de estudio; en segunda medida, el estado del arte permitirá dar nociones cuantitativas de las capacidades de la fibra de la hoja de piña desde enfoques internacionales, nacionales y locales; en tercer lugar, el marco teórico permitirá comprender las teorías necesarias para lograr los objetivos específicos y el objetivo general del presente proyecto.

2.1 Marco Conceptual

Piña

La Piña, de nombre científico *Ananas comosus* de la familia *Bromeliaceae* es una planta cuya altura desde sus raíces hasta la corona varía entre los 0.9 m y 1.8 m, produce un fruto escamoso y de forma ovalada, rodeado de hojas radiales en forma de espiral. Esta planta es originaria de sur y centro América, se produce en regiones con climas tropicales y húmedos (Jawaid et al., 2020).

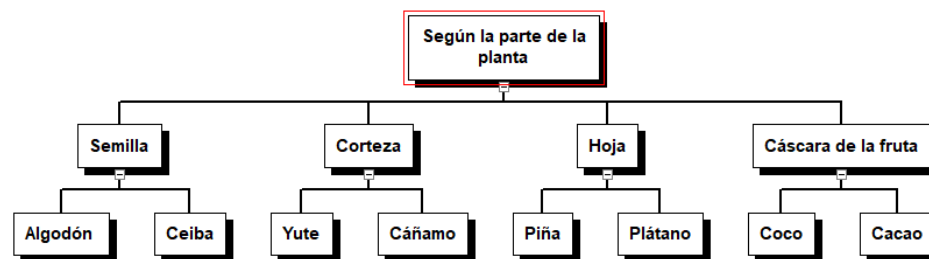
Fibras naturales

Las fibras naturales son materiales fibrosos de origen biológico que se pueden clasificar en dos tipos: animal o vegetal, cada uno con diferentes características (Rodríguez,2020). Las fibras de origen animal son producto de secreciones de glándulas o de folículos pilosos de animales, siendo la seda y lana los ejemplos más comunes. Las fibras vegetales son extraídas de las plantas; la celulosa, la hemicelulosa y la lignina suelen ser los principales componentes de estas y cumplen

la función de dar soporte a las plantas (Jain & Sinha, 2022b). Las fibras naturales se pueden clasificar según la parte de la planta de donde se extrae como se muestra en la Figura 1 **¡Error!** No se encuentra el origen de la referencia. (Jawaid et al., 2020).

Figura 1

Clasificación de las fibras vegetales



Celulosa

La celulosa es uno de los polímeros naturales de mayor abundancia en la naturaleza puesto que puede ser encontrada en todo tipo de cuerpos vegetales, algas, microorganismos e incluso en los caparzones de diferentes crustáceos del océano (Gañán et al., 2017). Químicamente es un polímero de la D-glucosa que se unen entre sí por enlaces β -1 \rightarrow 4 altamente estables y resistentes, además de que sus moléculas están unidas por enlaces de hidrogeno, lo que la convierte en el material estructural más importante para la planta y sus fibras (Guarnizo et al., 2009).

Hemicelulosa

La hemicelulosa es un grupo de heteropolisacáridos constituidos por cadenas de azúcares como pentosas, hexosas, ácidos urónicos y desoxiehexosas, tiene una forma ramificada y cumple la función de ser la interfaz de la celulosa con la lignina, regular la hidrólisis y dar soporte estructural (Rivas Siota, 2014).

Lignina

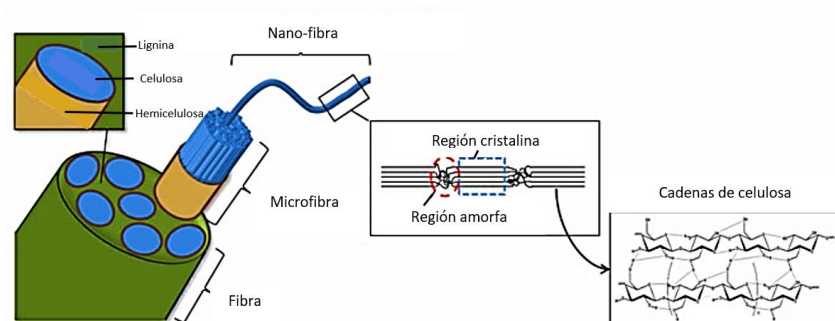
La lignina es un polímero formado por unidades de fenilpropano que se alternan de manera desordenada rodeando y aglomerando las fibras celulósicas lo que les brinda una mayor rigidez y una capa impermeabilizadora que las protege (Gutiérrez et al., 2020).

Fibra de hoja de piña

Las fibras extraídas de las hojas de la piña, más conocidas como PALF (Pineapple Leaf fiber) son un tipo de fibras naturales que poseen rigidez y resistencia relativamente alta, además de ser hidrofílicas. Su forma suele ser alargada conformada por pequeñas microfibrillas unidas entre sí como se muestra en la Figura 2 (Sandoval Barrantes et al., 2021). Las fibras suelen estar conformadas por una gran cantidad de celulosa con cantidades mínimas de hemicelulosa y lignina, según Jawaid et al. (2020) estas cantidades son cercanas al 81.27%, 12.31% y 3.46% respectivamente. Un alto contenido de celulosa les permite a las fibras tener resistencia térmica y mecánica relativamente alta, biodegradabilidad y bajo costo, puesto que son extraídas de desechos agrícolas lo que contribuye a disminuir la contaminación del medio ambiente (Jain et al., 2021a).

Figura 2

Estructura de la fibra.



Nota. Adaptado de: Jawaid et al., 2020

Hilo

Un hilo es un conjunto de múltiples fibras, naturales o sintéticas, las cuales después de ser fabricadas o extraídas de las plantas u animales en caso de ser de origen biológico, deben ser hiladas y retorcidas para formar los hilos como los mostrados en la Figura 3, los cuales dependiendo de la cantidad de fibras usadas tiene una densidad lineal específica (Corbin et al., 2018).

Figura 3

Hilo formado por fibra de hoja de piña

**Propiedades mecánicas**

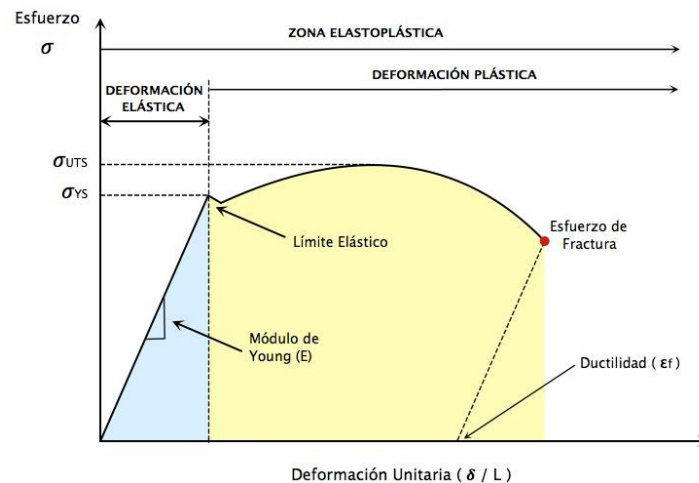
Las propiedades mecánicas de un material son asociadas a su capacidad de resistir esfuerzos y deformaciones sin presentar alguna falla, las cuales son determinadas a partir de ensayos experimentales que se realizan sobre probetas del material a estudiar. Uno de los ensayos más usados para determinar dichas propiedades es el ensayo de tracción directa (Russell C. Hibbeler, 2011).

Ensayo de tracción

Este ensayo consiste en exponer el material a una fuerza axial de tracción que aumenta progresivamente, lo que ocasiona una deformación gradual y un incremento en la longitud de este. Con los resultados de esta prueba se realiza una gráfica de esfuerzo vs deformación, donde dicho esfuerzo es el cociente entre la fuerza registrada y el área de la sección transversal del espécimen ensayado (Russell C. Hibbeler, 2011). Esta grafica (Figura 4) es de gran utilidad para determinar diferentes propiedades mecánicas a tracción de los materiales, como lo son el módulo de elasticidad (E), esfuerzo máximo (σ_{\max}), deformación unitaria máxima (ϵ_{\max}) y módulo de tenacidad (U_t) (Rodríguez Ofelia Andrea et al., 2014).

Figura 4

Curva esfuerzo vs deformación



Nota. Tomado de Rodríguez Ofelia Andrea et al., 2014

El módulo de elasticidad corresponde a la pendiente de la zona elástica la cual sigue una tendencia lineal y da un parámetro de rigidez del material. Por otra parte, el módulo de tenacidad se calcula

como el área bajo la curva esfuerzo vs deformación y me proporciona información de la energía disipada durante el ensayo de tracción.

2.2 Estado del Arte

El uso de las fibras naturales data desde aproximadamente 1970, año desde el cual se ha estudiado el uso de estas como refuerzo para productos poliméricos de diferentes industrias como la automotriz, ingenieril e incluso espacial. Lo anterior debido a que las fibras suelen presentar buenas propiedades mecánicas y térmicas (Vinod & Sudev, 2022), además de que el cambio climático y la contaminación debido a diversos residuos no biodegradables como fibras sintéticas, ha hecho que cada día el uso, estudio y aprovechamiento de estos recursos que generalmente son desechos agrícolas sea de mayor interés en el mundo como un remplazo para los productos sintéticos (Jain et al., 2021b).

Existe gran variedad de fibras naturales que despiertan interés debido a sus propiedades mecánicas, algunas de estas fueron revisadas por Betancourt, (2017) y se presentan en la Tabla 1. Como se observa de la Tabla 1, la fibra de piña tiene rangos muy amplios en los que varían sus propiedades, en algunos casos estas propiedades son superiores a las de otros tipos de fibra, lo cual la hace una fibra interesante para investigar.

Tabla 1:*Propiedades mecánicas fibras naturales*

Fibra	Densidad, [g/cm³]	Esfuerzo máximo de tensión, [MPa]	Modulo elástico, [GPa]
Madera	1.4	90-180	10-70
Lino	1.4-1.5	350-1040	28-70
Cáñamo	1.4-1.6	690	30-70
Yute	1.3-1.5	200-770	20-55
Algodón	1.5-1.6	290-490	5-12
Sisal	1.5	100-800	9-22
Kenaf	1.4-1.5	930	53
Hoja de piña	1.5	170-1672	82

Las propiedades mecánicas de las fibras dependen de la composición química de esta, principalmente del contenido de celulosa. La fibra de piña suele tener altos contenidos de celulosa. Por ejemplo, Asim et al., (2017) encontró que la fibra extraída de un cultivo en Indonesia tenía un 70.51% de celulosa, mientras que Jain et al., (2021b) y Sandoval Barrantes et al., (2021) encontraron contenidos de 78.3% y 45.32%, respectivamente, para fibras provenientes de la India y Costa Rica. En la Tabla 2 se presentan propiedades mecánicas de la fibra de hoja de piña reportadas por diferentes autores:

Tabla 2:*Propiedades mecánicas de la fibra de piña*

UBICACION DE PIÑA	VARIEDAD DE PIÑA	DIAMETRO [um]	MODULO DE ELASTICIDAD [Gpa]	ESFUERZO MAXIMO DE TENSION [Mpa]	DEFORMACION UNITARIA [%]	NORMA DE ENSAYO	METODO DE EXTRACCION	FUENTE
Colombia (Giron-Santander)	Perolera	60-70	-	198,94	-	-	-	(Penagos Santana, 2021)
Colombia (Cali)	-	-	7,9	486,08	5	ASTM C1557	-	(Hidalgo Salazar et al., 2017)
Colombia (Villanueva-Santander)	Oro miel	40-50	7,701	129	-	ASTM D3822	Manual	(Martínez Suárez et al., 2021)
Brasil	6 variedades diferentes	50-91	37.39-52.12	212-691	1.82-2.24	ASTM D3379-89	Manual	(Sena Neto et al., 2013)
Brasil	12 variedades diferentes	35-73	37-86	629-1309	1.5-3.5	ASTM D3379-75	Maquina decorticadora	(Sena Neto et al., 2015)
Malasia	-	136-192	-	98-125	-	ASTM D3379-75	-	(Sia et al., 2021)
Malasia	Josapine	90,7	-	393,7	3,24	ASTM C1557-03	Manual	(Yusof et al., 2015)
Malasia	-	105-300	18,934	293,08	1,41	-	-	(Todkar et al., 2019)
Malasia	-	-	9,044	141,09	1,75	ASTM D3379-89	Maquina	(Rizal et al., 2021)
-	-	20-80	34.5-80.5	416-1627	0.8-1.6	-	-	(Sarasini, 2018)
-	-	30-60	6,5	413	1,6	-	-	(Todkar et al., 2019)
-	-	50	4,2	413	3-4	-	-	(Lee et al., 2020)

Nota. En la tabla se puede apreciar un resumen con las principales propiedades y características de fibras singulares de la hoja de piña en un ámbito local, nacional e internacional.

Influencia de la longitud de las fibras en las propiedades mecánicas a tensión

Según Anand et al. (2022) el contenido de celulosa en la fibra de hoja de piña varía a lo largo de su longitud, lo que puede alterar sus propiedades mecánicas a tracción. Lo anterior no es

una característica única de la fibra de hoja de piña, según Esguerra & Forero, (2020) en las fibras naturales vegetales se presentan regiones amorfas y cristalinas de celulosa puesto que esta tiene una estructura desordenada, donde una región cristalina puede presentar rigidez a tracción hasta 15 veces mayor que una zona amorfa.

Estas características de no uniformidad celulósica provocan que el diámetro de una fibra sea variable a través de esta, en un estudio realizado por Besserer et al., (2015) se midió el diámetro de una fibra de hoja de piña en 10 regiones diferentes, encontrando que los rangos del diámetro variaban entre 0.1 mm y 0.28 mm.

Tomczak et al., (2007) estudiaron como estas variaciones afectaba las propiedades mecánicas a tensión de una fibra de curauá, encontrando que, al aumentar de 5 mm a 25 mm de calibre, el esfuerzo máximo de tensión disminuyo un 22%, este comportamiento puede relacionarse al aumento de no uniformidad en la fibra. Adicional a esto, el módulo de elasticidad se comportó de manera opuesta, pues aumento un 57% lo que se puede relacionar a que hay un mayor contenido de celulosa en una longitud más larga

2.3 Marco Teórico

Análisis estadístico descriptivo

Cuando se requiere dar una descripción de un fenómeno que ocurre dentro de una muestra o población, la estadística es la herramienta que nos permite dar conclusiones y eliminar la subjetividad en la que se puede incurrir. La estadística descriptiva nos permite ordenar, resumir y analizar un conjunto de datos, con el objetivo de eliminar aquellos que no son representativos y poder hacer una caracterización más exacta del fenómeno o característica que deseemos estudiar (Xunta de Galicia, 2014).

Un análisis estadístico descriptivo incluye gráficos donde se representen o comparen datos, medidas de tendencia central como moda, media y mediana. Adicional incorpora un análisis de dispersión donde se analiza que tan cercano o alejados están nuestros datos de la media a través de medidas de dispersión como el rango, desviación estándar y el coeficiente de variación (Flores Cebrián, 2009).

Microscopia electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido MEB (Scanning Electron Microscope SEM) es uno de los instrumentos más eficientes en lo que a observación microscópica se refiere al poseer mejor potencia de resolución por encima de los microscopios ópticos en los cuales esta es deficiente (Metalinspec, 2022).

Su funcionamiento de este método consiste en la emisión de electrones que al ser direccionados sobre el punto de estudio interactúan con los átomos de la superficie de la muestra, produciéndose varios tipos de radiación. Esta radiación es recolectada por detectores, los cuales proporcionan información morfológica (forma y tamaño de las partículas), topográfica (características de la superficie) e información cristalográfica (ordenamiento de los átomos) del material en estudio a través de imágenes que pueden alcanzar 1'000.000 de aumentos hasta con una resolución de unos 2 nm.

Múltiples autores han recurrido a esta técnica para analizar la morfología de algunas fibras naturales, por ejemplo Jain & Sinha, 2022 compararon las superficies de fibras de hoja de piña, tallo de maíz y nappier (comúnmente conocida como hierba de elefante) encontrando que la primera tenía la superficie más rugosa en comparación con las otras dos. También Laverde Sarmiento (2023) también incluyó esta técnica en sus investigaciones, donde a través del SEM

analizo la sección transversal y la superficie de fibras de fique con el fin de determinar el área de esta y los efectos de diferentes tratamientos superficiales sobre esta fibra.

Como se ha mencionado anteriormente el SEM es una técnica bastante eficaz para toma de imágenes de secciones transversales de fibras naturales. Estas imágenes pueden ser procesadas permitiendo encontrar valores de área, lo cual es parte fundamental en el estudio de propiedades mecánicas de materiales, tal como lo hizo (María & Diego, 2017) quienes con el uso de los softwares Photoshop y Matlab lograron determinar el área de la sección transversal de hilos de fique a partir de una imagen de microscopía.

Ley de Hooke

Como se muestra en la figura 4 en la parte inicial del diagrama esfuerzo vs deformación, el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación, es decir un comportamiento lineal, esta relación de proporcionalidad es llamada ley de Hooke.

Gran parte de los materiales usados en ingeniería están predispuestos para sufrir pequeñas deformaciones las cuales se encuentran dentro de esta región lineal. Esta, al tener un comportamiento rectilíneo posee una constante de proporcionalidad denominada E la cual es conocida como módulo de elasticidad o módulo de Young (BEER & JOHNSTON, 2009).

Así pues, es posible describir la ley de Hooke en la ecuación (1):

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

σ : Esfuerzo (MPa)

ε : Deformación unitaria (mm/mm)

3. Metodología

Esta sección describe los materiales y métodos empleados para lograr los objetivos planteados del proyecto de investigación. La metodología se desarrolló de la siguiente manera: El numeral 3.1 describe como se obtuvo el hilo de fibra de hoja de piña y la selección de las muestras usadas para el estudio. El numeral 3.2 detalla el proceso de fabricación de probetas para ensayos de microscopía y el procesamiento que se realizó a las micrografías para determinar el área de la sección transversal del hilo. El numeral 3.3 especifica el procedimiento para fabricar probetas para ensayos de tracción y su posterior ejecución. Finalmente, en el numeral 3.4 se calculan las propiedades mecánicas a tracción para las tres longitudes ensayadas.

3.1 Compra y selección de materia prima

La materia prima fue adquirida a través de la Asociación Hecho en Lebrija, a quienes se compró cuatro carretes de hilo (Figura 5), para un total de dos libras de hilo de fibra de piña para la investigación. Estos hilos fueron extraídos en cultivos de piña del municipio de Lebrija, Santander, una zona ubicada a 1,055 msnm y con una temperatura media de 23 °C.

Figura 5

Libra de hilo artesanal fibra de hoja de piña



Estos hilos fueron elaborados de manera artesanal, por lo que no se dispone de información sobre su densidad lineal ni de su grado de torsión. Además, se observó que este hilo no era uniforme a lo largo de su longitud, es decir, presentaba variaciones en el espesor, las cuales fueron identificadas por medio de inspección visual. Esto sugiere que la densidad no era uniforme, debido a que la elaboración artesanal no permite un control preciso del hilado.

Con el objetivo de reducir la dispersión de datos que se pudiera obtener debido a esta no uniformidad, se decidió determinar la densidad lineal de los hilos para hacer una clasificación de acuerdo con está y tomar los tramos más uniformes para la realización de las probetas. Para determinar esta propiedad se cortaron longitudes de 1 m y se almacenaron en bolsas de cierre hermético para evitar que adquirieran humedad, afectando así su peso. Posterior a ello, se realizó el pesaje de cada metro de hilo cortado usando una balanza analítica RADWAG AS 220.R2, la cual registra valores de hasta cuatro cifras significativas (Figura 6), marcando y almacenando cada muestra para su posterior uso.

Figura 6

Pesaje de hilos en balanza

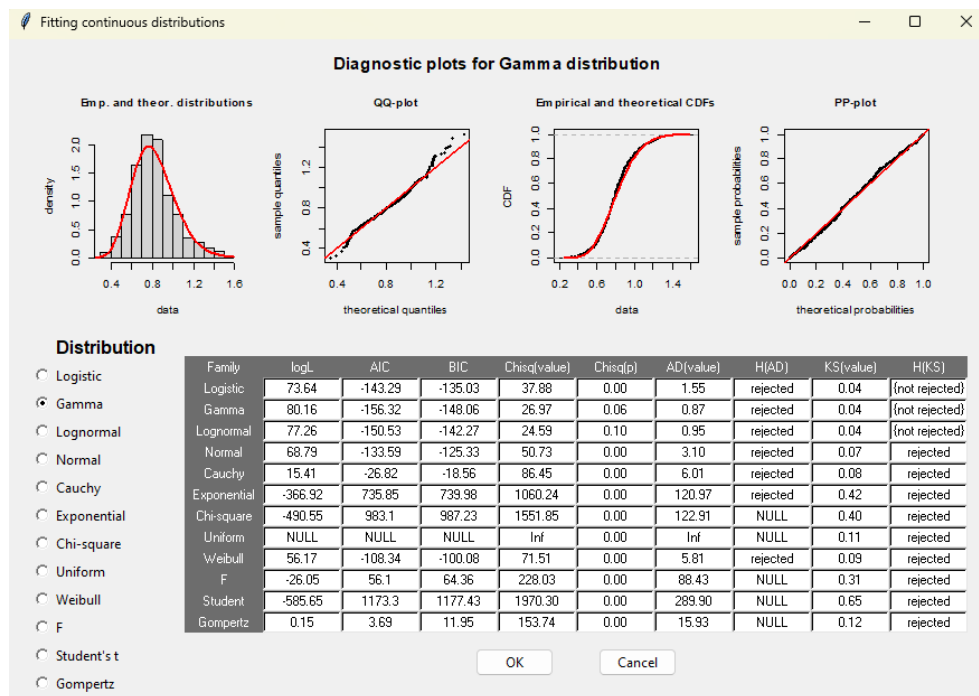


En total se registraron datos de 459 muestras, a las cuales se les realizó un análisis estadístico para establecer a que tipo de distribución se ajustaba su densidad lineal. El procedimiento se ejecutó por medio del paquete estadístico “rriskDistributions” (Belgorodski et al., 2017) desarrollado dentro del software R (*RStudio Desktop*, n.d.) , a partir del cual se detalló que la distribución con mejor ajuste era inicialmente aquella que no rechazaba las pruebas de bondad y posteriormente la que tuviera los menores valores del índice AIC y BIC.

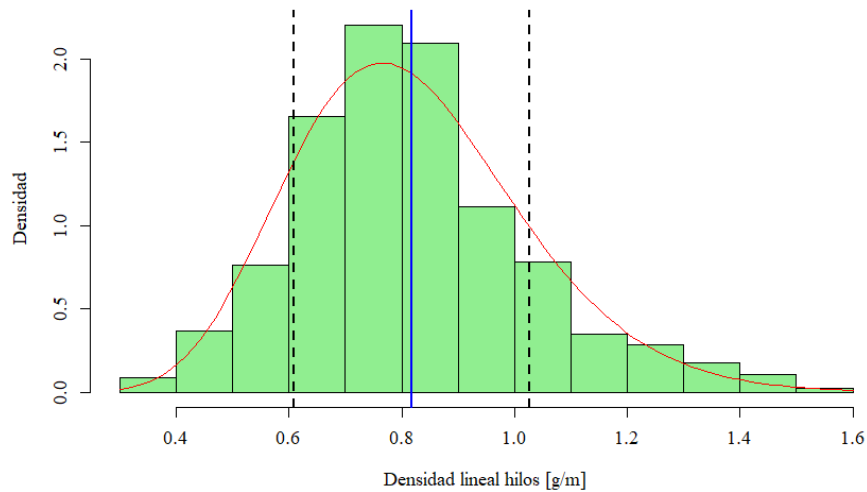
Una vez hecho el análisis, la distribución GAMMA fue la que mejor se ajustó a los datos como se observa en la Figura 7 y en el histograma de densidades mostrado en la Figura 8.

Figura 7

Distribución de ajuste de densidad lineal de hilos



Nota. En el gráfico se muestra como los datos se ajustan a una distribución GAMMA, con índices de AIC y BIC de -156.32 y -148.06 respectivamente.

Figura 8*Histograma y Distribución GAMMA de densidad lineal de hilos*

Nota. La línea vertical continua representa la media y las líneas verticales punteadas representan la media \pm la desviación estándar.

Realizado este análisis se estableció trabajar con los hilos que se encontraban dentro del rango de 700 a 900 Tex en el cual hay mayor concentración hacia la media (818 ± 208 Tex) pues presentaban una mayor uniformidad en su densidad lineal. Dentro de este rango había un total de 197 hilos para elaborar 60 probetas para ensayos de tracción y 3 probetas para ensayos de microscopía, para un total de 108 hilos requeridos.

3.2 Determinación del área de la sección transversal del hilo de fibra de piña

3.2.1 Fabricación de probetas para microscopía

Para la elaboración de las probetas se seleccionaron al azar 48 hilos de los 197 disponibles dividiéndolos en grupos de 16 para cada probeta. Esta probeta consiste en una pastilla de resina con hilos encapsulados dentro, para realizar micrografías a su sección transversal. Para fabricarla,

los hilos se insertaron dentro de un molde de silicona rectangular, el cual tiene orificios en dos de sus caras para que los hilos puedan pasar de un lado a otro, como se muestra en la Figura 9 y que al encapsular con la resina se mantengan en posición recta y horizontal.

Figura 9

Preparación de probetas para determinar área



(a)



(b)

Nota. (a) Molde de silicona (b) Hilos insertados

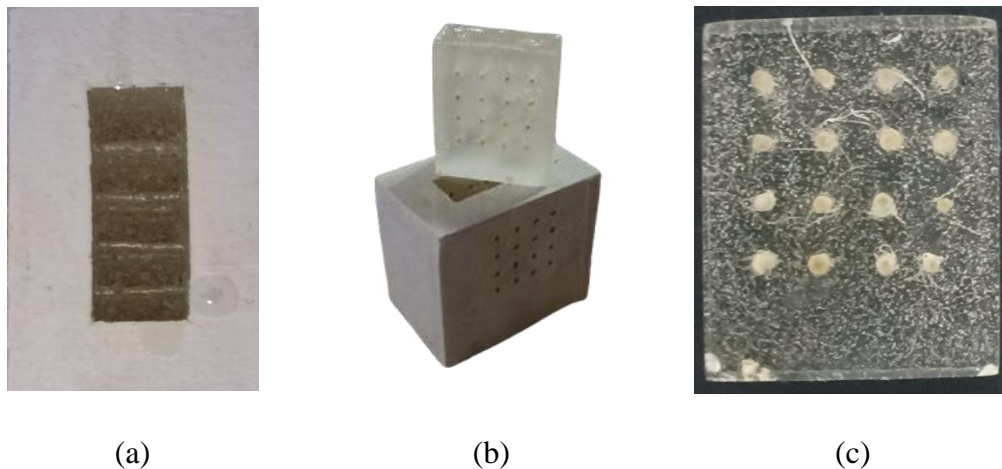
Teniendo los hilos insertados en el molde se preparó la resina, adquirida en la empresa Ingeniería Química de Bucaramanga, siguiendo las indicaciones del proveedor. Para este caso se usó una resina epóxica gemelos rígida la cual se preparó mezclando cantidades iguales en volumen del componente A (resina previamente calentada a 60°C) y del componente B (catalizador). Precalentar la resina ayuda a evitar la aparición excesiva de burbujas en la mezcla, las cuales podrían aparecer dentro de las imágenes capturadas por el microscopio, dificultando el correcto tratamiento y posterior cálculo del área de la sección transversal del hilo.

Una vez preparada la resina se vertió dentro del molde, Figura 10 – a, y se dejó endurecer durante 24 horas, dando como resultado una pastilla rígida, Figura 10 – b, a la cual se le realizó un proceso de pulido. Para ello se lijo a través de una serie de lijas que van de un número de grano

grueso a uno fino (#220, 240, 280, 320, 400, 600, 1200 y 2500) hasta obtener un acabado uniforme. Seguidamente se seleccionó una cara de la probeta para la toma de micrografías, a la cual se le realizó un pulido adicional con la pulidora metalográfica del laboratorio de metalografía UIS, dando como resultado una superficie lisa y brillante, Figura 10 – c, lo que permite capturar imágenes de mejor calidad.

Figura 10

Preparación de probetas para determinar área



Nota. (a) Resina vertida en molde. (b) Pastilla desmoldada, (c) Pastilla pulida.

Este proceso se realizó tres veces, encapsulando en total 48 hilos, lo cual permitió tener una cantidad suficiente de micrografías para calcular el área de la sección transversal.

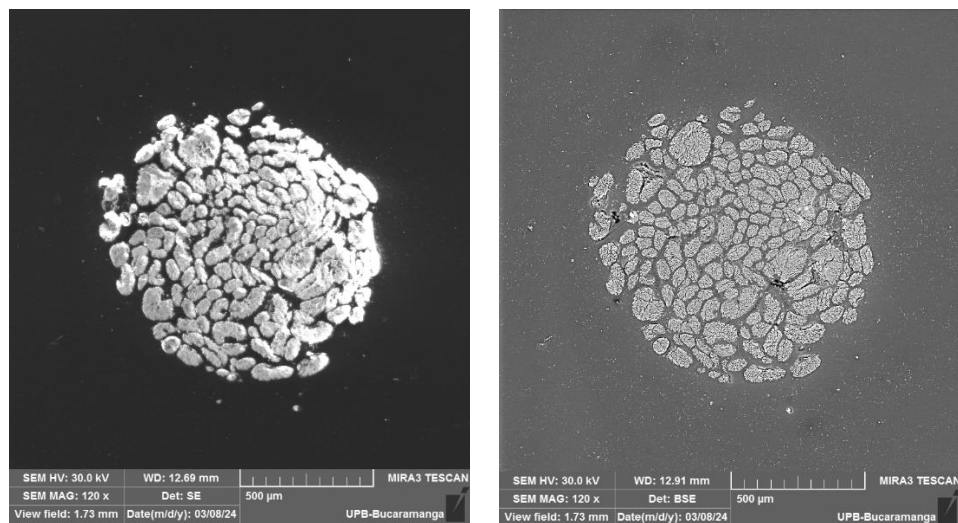
3.2.2 Procesamiento digital de imágenes SEM (Scanning Electron Microscopic)

Con las tres probetas para ensayos de microscopía se tomaron micrografías a cada uno de los 48 hilos en el laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, usando un microscopio electrónico de barrido de marca TESCAN modelo MIRA 3 FEG-SEM.

Las micrografías se capturaron en dos formatos diferentes, uno corresponde a micrografías SE (Figura 11– a) las cuales se obtienen del detector de electrones secundarios que arrojan información de la topografía de la superficie de la muestra en estudio. El otro formato de micrografía es el BSE (Figura 11– b), conseguidas a través del detector de electrones retro dispersados, el cual también captura una imagen topográfica de la superficie, pero con la diferencia que se obtiene una imagen en escala de grises en función de los elementos presentes en la muestra (UPV, 2020). En el apéndice A se presentan los dos formatos para los 48 hilos.

Figura 11

Formato de micrografía



(a)

(b)

Nota. (a) SE. – (b)BSE.

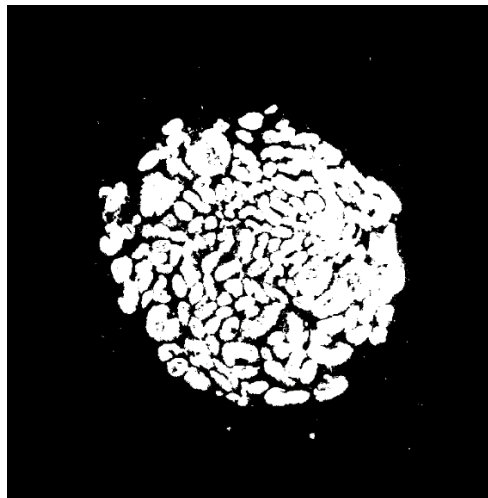
Para calcular el área de la sección transversal de los hilos se usaron las micrografías tipo SE y dos códigos de Matlab (*MATLAB - El Lenguaje Del Cálculo Técnico*, n.d.) para realizar un tratamiento digital de la imagen.

El primer código (Apéndice B) realiza un análisis de las intensidades de grises presentes en la imagen SE, arrojando el histograma de intensidades de la imagen, así como los valores de media, mediana y desviación estándar (SD) de estas. Con estos datos se busca seleccionar un umbral de intensidades para realizar el análisis de áreas. Dicho umbral representa un valor de corte sobre los valores de intensidad que serán considerados como parte del hilo o parte de la resina presente en la probeta.

El segundo código (Apéndice C) realiza una binarización de la imagen, convirtiendo aquellos pixeles que se encuentren por encima del umbral seleccionado a color blanco (Hilo) y los que se encuentren por debajo a color negro (Fondo) como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Micrografía binarizada



Una vez binarizada la imagen, el código etiqueta cada una de las regiones blancas y les calcula el área, descartando aquellas cuya superficie sea menor a 100 píxeles², pues estas son pequeñas impurezas o imperfecciones que podrían haberse incrustado en la probeta durante su fabricación. Finalmente, las áreas que superen este valor son consideradas parte de la sección

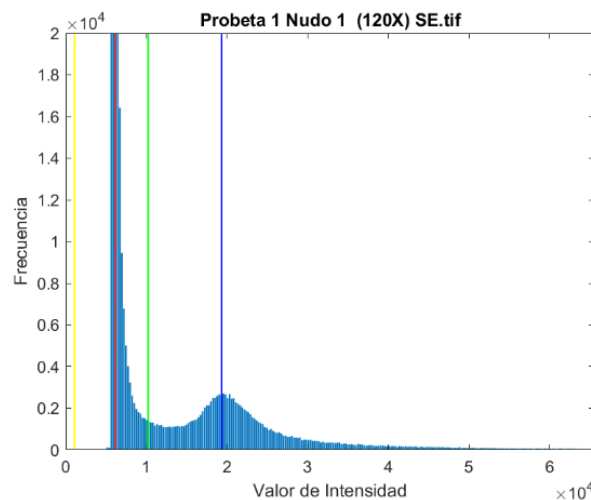
transversal del hilo, para luego realizar la sumatoria de áreas en píxeles². Este valor, de acuerdo con la escala de cada imagen, se convierte a mm².

3.2.2.1 Determinación del umbral de intensidades. Para determinar este umbral, se realizaron iteraciones usando el segundo código del cálculo de área. Cada iteración toma como umbral uno de los parámetros determinados con el primer código (mediana, media, media \pm SD).

Un valor de umbral adicional se determinó a partir de los histogramas de intensidad para cada imagen. En estos se observó que existen dos distribuciones presentes, como se muestra en la Figura 13. Para las micrografías analizadas, la distribución a la izquierda corresponde a intensidades oscuras, que se relacionan al fondo de resina y la distribución a la derecha corresponde a las intensidades claras relacionadas al hilo encapsulado.

Figura 13

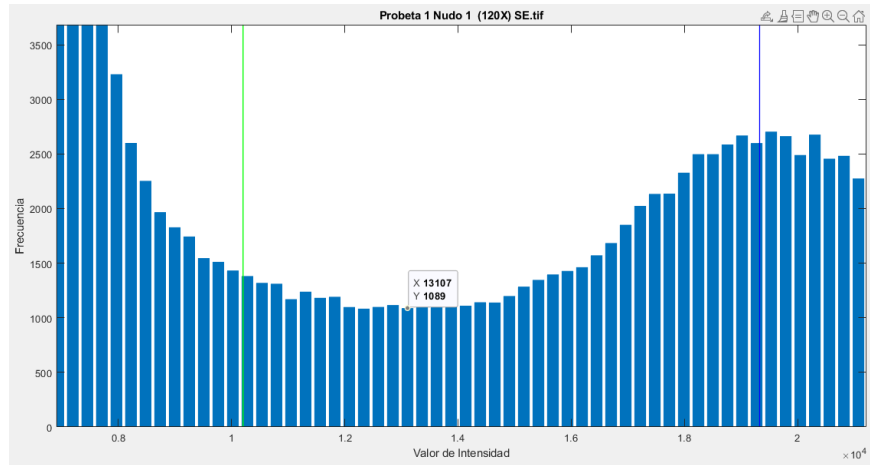
Ejemplo de histograma de intensidades



Con base a este análisis se definió como umbral el punto de intersección de las dos distribuciones (Figura 14), pues este valor es una aproximación cercana al punto donde se divide las áreas que se quieren calcular (fibra vegetal) de las que no (resina).

Figura 14

Zoom del histograma ejemplo en la zona de intersección distribuciones de intensidades

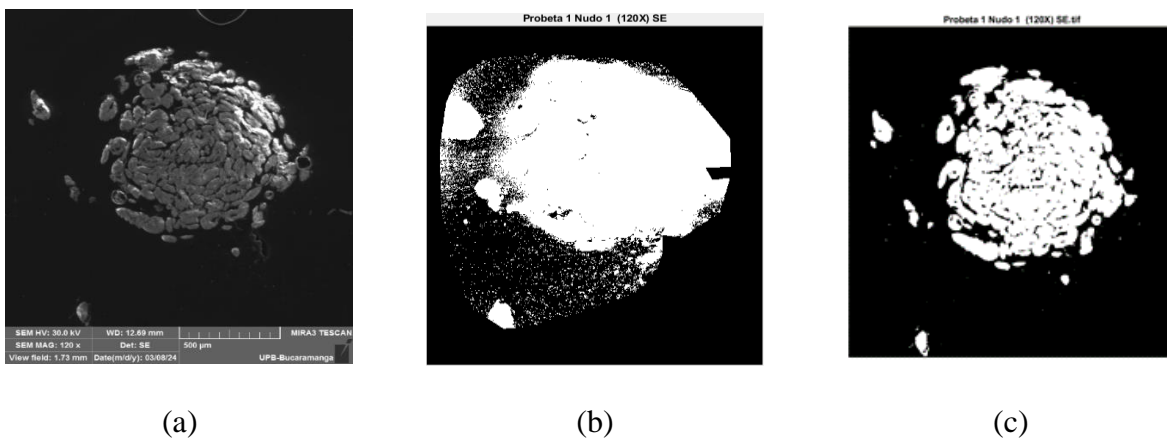


Nota. (a) Umbral = 13107

Una vez definidos los umbrales (Apéndice D) se analizaron las áreas obtenidas para cada uno de estos, comparando las imágenes y los valores de área obtenidos como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

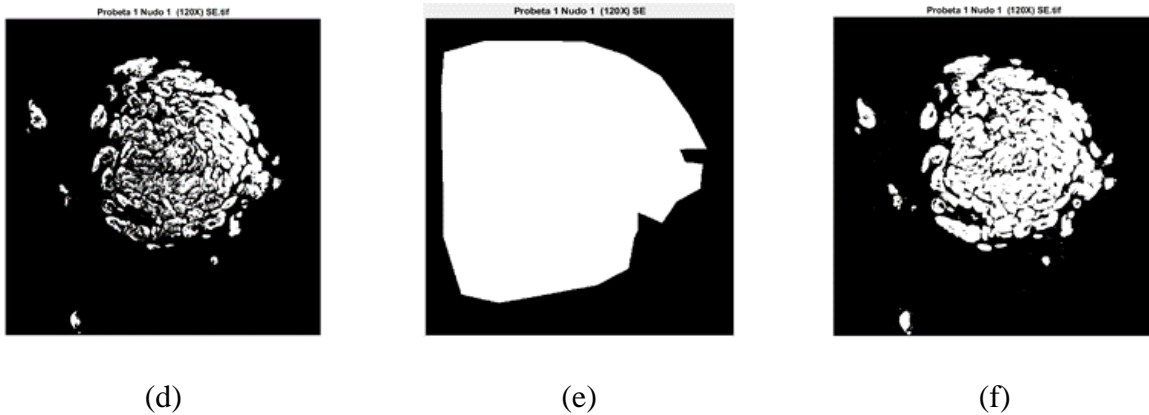
Comparación entre umbrales y áreas



(a)

(b)

(c)



Nota. (a) micrografía original, (b) mediana $a = 1.174 \text{ mm}^2$, (c) media $a = 0.670 \text{ mm}^2$, (d) media + SD $a = 0.386 \text{ mm}^2$, (e) media - SD $a = 1.861 \text{ mm}^2$, (f) punto de intersección distribuciones $a = 0.607 \text{ mm}^2$.

Este procedimiento se realizó para todas las micrográficas, descartando los umbrales de mediana y media – SD, los cuales proporcionaron una imagen binarizada que no es representativa de la forma del hilo al cual se quiere encontrar su valor de área. Por otra parte, la media, media + SD y el punto de intersección de las dos distribuciones del histograma sí proporcionaron imágenes binarizadas muy cercanas a la forma real del hilo.

Analizando los 48 hilos se definió como umbral para el cálculo de área el punto de intersección del histograma, pues es el que mejor se ajusta a la forma real del hilo. En los apéndices E y F se muestran las imágenes binarizadas y los resultados de área para cada umbral.

3.3 Fabricación de probetas y ejecución de ensayos mecánicos

3.3.1 Fabricación de probetas para ensayos a tracción

Se seleccionaron 60 hilos al azar de los 197 que se definieron en la sección 3.1 de la metodología. Estos 60 hilos se distribuyeron en tres grupos para generar las tres longitudes de calibre estudiadas, es decir, 20 hilos para fabricar las probetas por cada longitud. Las longitudes

que se definieron para lograr el objetivo general del proyecto fueron de: 250, 175 y 100 mm, siendo la de 250 mm la longitud de referencia establecida por la norma ASTM D2256 (ASTM, 2022).

En la Figura 16 se observa la adaptación empleada para la fabricación de las probetas, en la cual los extremos de la longitud libre calibrada se encuentran encapsulados en resina epóxica. El encapsulado ayudará a garantizar una correcta sujeción durante la ejecución de los ensayos mecánicos, además de disminuir el contacto directo entre la mordaza de la máquina y los hilos, acción que favorece al material al no presentarse en este ningún aplastamiento o daño.

Figura 16

Adaptación probetas ensayos de tracción



Para la elaboración de las probetas se fabricaron dos moldes de silicona, que permitieron encapsular los extremos libres de cada uno de los hilos. Adicional, se usó una tabla con líneas guías, en donde se apoyaron los moldes de silicona y donde se pudiese obtener las longitudes calibradas correctamente; resina epóxica gemelos rígida, con la cual se logró encapsular los extremos de los hilos; vasos desechables, para la medición exacta de la resina; fibra de vidrio, para darle mayor rigidez al encapsulado de los extremos de los hilos y ganchos metálicos, para asegurar la sujeción y verticalidad de los hilos. Cada uno de estos materiales se pueden observar en la Figura 17.

Figura 17

Materiales para fabricación probetas ensayos de tracción



Inicialmente, se ubicaron los dos moldes de silicona sobre las líneas guías, según la longitud calibrada a realizar. Posteriormente, dentro de los moldes se introdujo una primera capa de fibra de vidrio, para luego pasar los hilos por cada una de las hendiduras que se les fabricaron a los moldes. Adicional a esto, se les incrusto a los extremos sobrantes de los hilos unos ganchos metálicos para su correcta sujeción (Figura 18).

Figura 18

Sujeción de los hilos



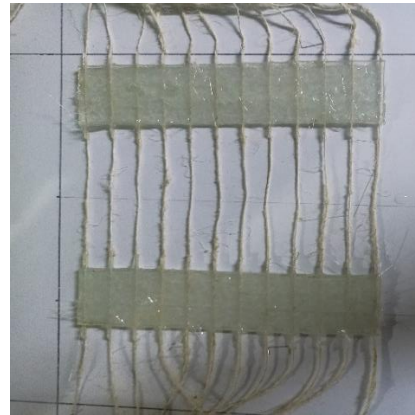
Seguidamente se preparó la resina epóxica según las indicaciones del proveedor, esta se vertió sobre los extremos encapsulados en los moldes de silicona, posteriormente se introdujo una segunda capa de fibra de vidrio y se vertió la resina restante (Figura 19-a). Luego se dejó endurecer por 24 horas para desmoldar (Figura 19-b) y finalmente se procedió a separar cada una de las probetas por medio de una sierra sinfín (Figura 19-c, Figura 19-d), puesto que en cada preparación se generaron 10 probetas de forma continua.

Figura 19

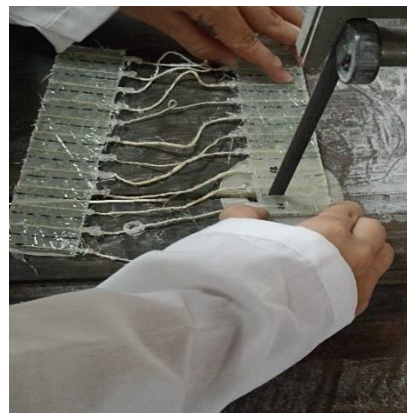
Fabricación de probetas para ensayos de tracción



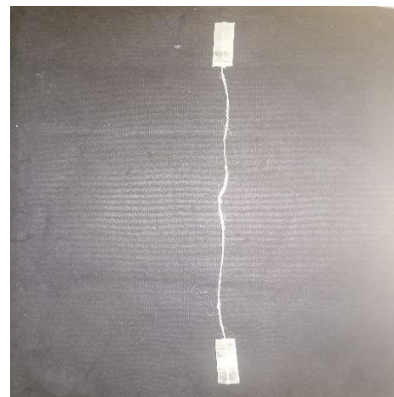
(a)



(b)



(c)



(d)

Nota. (a) vertido resina, (b) probetas desmoldadas, (c) corte de probetas, (d) probeta de ensayo.

3.3.2 Ejecución de ensayos

Los ensayos de tracción se ejecutaron en el laboratorio de ensayos mecánicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, usando la MTS bionix landmark 370 y siguiendo la norma ASTM D2256. Esta norma también fue empleada para realizar ensayos de tracción por Fernández Rojas (2018) y Camargo Méndez & García Alfonso (2017) en hilos de fique, Ashadujjaman et al. (2021) en hilos de yute y Gahgah et al. (2023) en hilos de sisal.

La velocidad de ensayo seleccionada fue de 20 mm/min y se estableció como la más óptima por parte del grupo investigador luego de revisar la literatura mencionada anteriormente, pues en estos se aplicaron rangos dentro de los 2 a 50 mm/min. Por otra parte, la pretensión se calculó usando la densidad lineal obtenida en 3.1 y la fórmula definida en la norma, donde este parámetro se calcula como $0.5 \pm 0.1 \text{ cN/tex}$. El rango de la pretensión para este hilo oscila entre los 3 a 5 N.

El procedimiento para la ejecución de los ensayos mecánicos consistió en: primero, ajustar un extremo de la probeta a la mordaza inferior de la máquina universal de ensayos; segundo, ajustar el otro extremo de la probeta a la mordaza superior, aplicando la pretensión establecida de 3 N (Figura 20); tercero, iniciar el ensayo de tracción con tasa de deformación controlada (20 mm/min) y finalmente detener luego de la falla de la probeta.

Figura 20*Montaje ensayos de tracción*

Los datos extraídos de la MTS fueron la fuerza axial aplicada al hilo en Newtons (N) y el desplazamiento del cabezal (ΔL) en milímetros, siendo estos valores datos de entrada para determinar las propiedades mecánicas.

3.4 Determinación de las propiedades

En este apartado se describe el procedimiento empleado para determinar las propiedades mecánicas del hilo de fibra de piña. Las propiedades determinadas fueron: módulo de elasticidad (E), esfuerzo máximo (σ_{max}), deformación unitaria máxima (ϵ_{max}) y módulo de tenacidad (U_t).

3.4.1 Cálculo de esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación unitaria máxima (ϵ_{max})

Por definición matemática, la deformación unitaria se calcula por medio de la ecuación (2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Donde:

ε : Deformación unitaria (mm/mm)

ΔL : Desplazamiento o cambio de longitud (mm)

L_0 : Longitud de calibre (mm)

Esta deformación unitaria se calculó para cada uno de los puntos registrados por la MTS en cada una de las probetas ensayadas. Adicionalmente, la fuerza se transformó en esfuerzo por medio del dato de área que se determinó en 3.2 a través de la ecuación (3).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde:

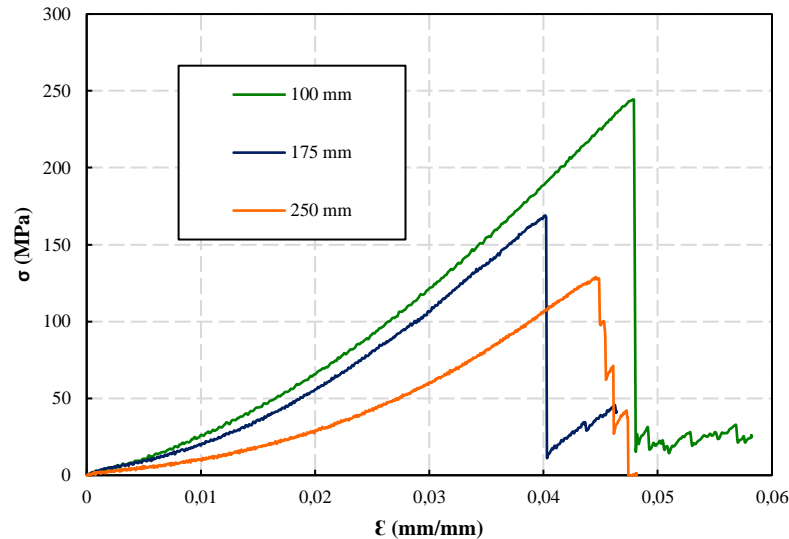
σ : Esfuerzo (MPa)

F: Fuerza (N)

A: Área (mm²)

Teniendo estos dos datos para cada una de las 60 probetas se procedió a construir las curvas esfuerzo vs deformación unitaria (σ vs ε). El punto más alto de la curva se estableció como el esfuerzo máximo y, por ende, el dato que se relacionaba en el otro eje con este valor se estableció como la deformación unitaria máxima.

En la Figura 21 se observan ejemplos de curvas σ vs ε por cada una de las longitudes analizadas. Este procedimiento se repitió para todas las probetas para posteriormente determinar el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada longitud.

Figura 21*Curvas esfuerzo vs deformación unitaria*

3.4.2 Cálculo del módulo de elasticidad (E)

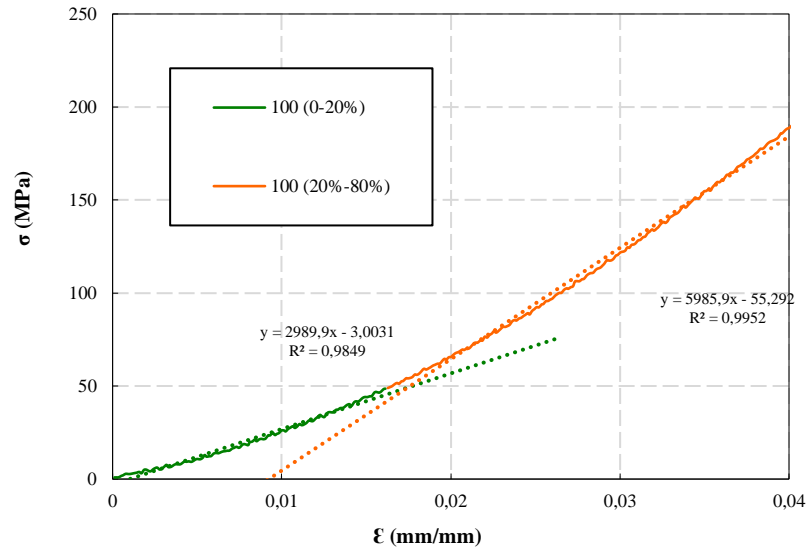
Con la consideración de que los hilos naturales normalmente llegan a presentar un comportamiento bilineal, se estableció determinar el módulo de elasticidad en dos zonas. La primera zona correspondió al rango entre el 0 y 20 % del esfuerzo máximo y la segunda zona, entre el 20 y 80 % de este mismo esfuerzo.

Para cada una de las probetas se seleccionaron los datos que correspondían a dichas zonas. Luego, se procedió a graficar estos puntos para determinar la línea de tendencia, junto con su ecuación de la recta y coeficiente de determinación (R^2).

La pendiente de estas rectas es el módulo de elasticidad. A modo de ejemplo, se puede observar en la Figura 22 los valores de módulo ($E_{0-20\%} = 2989.9$ MPa y $E_{20-80\%} = 5985.9$ MPa) para un hilo de $L = 100$ mm. Al terminar el procesamiento de los datos en cada zona para todas las probetas, se determinó el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Figura 22

Bilinealidad curva esfuerzo vs deformación unitaria



3.4.3 Cálculo de módulo de tenacidad

El módulo de tenacidad se calcula como el área bajo la curva de la gráfica σ vs ϵ . Este valor representa la capacidad que tiene el hilo para absorber energía antes de la rotura. El área se determinó a través de la sumatoria de cada una de las áreas entre par de puntos (método de trapecios). Al igual que en los numerales 3.4.1 y 3.4.2 se determinó el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para esta propiedad.

4. Resultados

4.1 Área de la sección transversal de los hilos de fibra de piña

Se analizaron las 48 micrografías de los hilos como se describió en el numeral 3.2, encontrando los resultados que se muestran en la Tabla 3. El diámetro aparente promedio se determinó a través de la ecuación del área de un círculo.

Tabla 3

Resultados de área sección transversal

Área promedio (mm^2)	SD (mm^2)	CV (%)	Diámetro aparente promedio (mm)
0.675	± 0.162	24.067	0.927

Esta área se encuentra dentro de los rangos que suelen tener este tipo de hilos formados por fibras naturales. Por ejemplo, Camargo Méndez & García Alfonso (2017) y Laverde Sarmiento et al. (2023) reportaron áreas de la sección transversal de hilos de fique en estado natural con valores de 0.239 mm^2 y 1.04 mm^2 respectivamente.

4.2 Propiedades mecánicas a tracción del hilo

4.2.1 Esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación unitaria máxima (ϵ_{max})

Al calcular el valor de las deformaciones unitarias máximas a partir de las curvas σ vs ϵ (Figura 23, Figura 24, Figura 25) se estableció que esta propiedad varía dentro de los siguientes rangos: 3.30 a 5.54 %, 3.00 a 5.22 % y 2.71 a 5.43 % para las longitudes de 100, 175 y 250 mm, respectivamente. Comparando estos resultados con investigaciones previas, se observa que los valores reportados para fibras singulares (filamentos) de hoja de piña en Malasia han oscilado entre

1.41 y 3.24 % (Todkar & Patil, 2019), (Yusof et al., 2015), mientras que en Brasil los valores varían entre 1.5 y 3.5 % (Sena Neto et al., 2015). En contraste, estudios realizados en otras regiones de Colombia han reportado deformaciones unitarias máximas de hasta el 5 % (Hidalgo Salazar & Betancourt Sánchez, 2017), valor que es similar al rango máximo observado en este estudio.

En cuanto a las deformaciones unitarias máximas promedio obtenidas para cada una de las tres longitudes ensayadas, se observa una disminución a medida que se aumenta la longitud, evidenciando una relación inversa. Los porcentajes de disminución que se presentaron fueron de 5.94 % al pasar de $L = 100$ mm a $L = 175$ mm y del 2.21 % al pasar de $L = 175$ mm a $L = 250$ mm.

El esfuerzo máximo para este material oscilo entre 71.46 a 244.23 MPa, 63.04 a 195.02 MPa y 61.25 a 172.60 MPa para las longitudes de 100, 175 y 250 mm respectivamente. En términos de los valores promedio, el esfuerzo máximo mostró una tendencia inversa similar a la observada en la deformación unitaria máxima. La disminución en el esfuerzo máximo promedio al incrementar la longitud de 100 a 175 mm fue de 21.11 %, mientras que, al pasar de 175 a 250 mm, fue de 6.49 %. Los resultados de esfuerzo máximo promedio, deformación unitaria máxima promedio, desviación estándar y coeficiente de variación se encuentran en la Tabla 4.

4.2.2 Módulo de elasticidad (E)

El módulo de elasticidad se determinó para dos zonas de la curva σ vs ϵ cómo se indicó en el numeral 3.4.2 de la metodología. Para todas las longitudes ensayadas se logra apreciar el incremento de dicho módulo al pasar de la zona 1 a la zona 2, los resultados se muestran en la Tabla 4. Con los datos de cada una de las zonas se determinó la relación $E_{(20-80\%)} / E_{(0-20\%)}$ para

las longitudes ensayadas, dicha relación es de 2.00 para $L = 100$ mm, 2.21 para $L = 175$ mm y de 2.23 para $L = 250$ mm.

Por otro lado, si se desea analizar el comportamiento de la zona 1 al aumentar la longitud de ensayo de los hilos esta presenta un comportamiento inverso, pues disminuye a medida que la longitud aumenta. Con la zona 2 ocurre lo mismo. Ahora bien, las disminuciones que se presentaron para la zona 1 corresponden a 22.93 % al pasar de 100 a 175 mm y del 4.43 % al pasar de 175 a 250 mm. Para la zona 2, las disminuciones fueron de 15.31 % y 3.10 % al pasar de 100 a 175 mm y de 175 a 250 mm respectivamente.

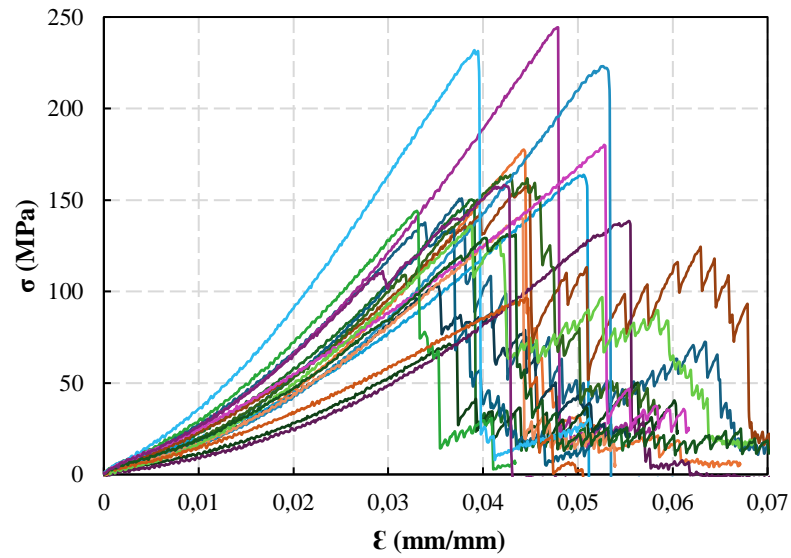
Tabla 4

Resumen de resultados de propiedades mecánicas

Longitud de calibre (mm)		100	175	250
Fuerza máxima (N)	\bar{x}	104,46	82,41	77,07
	SD	28,89	25,44	24,75
	CV	27,65%	30,87%	32,11%
Esfuerzo máximo (MPa)	\bar{x}	154,88	122,18	114,25
	SD	42,82	37,72	32,11
	CV	27,65%	30,87%	32,11%
Deformación unitaria máxima (mm/mm)	\bar{x}	4,30%	4,05%	3,96%
	SD	0,63%	0,64%	0,75%
	CV	14,65%	15,74%	18,88%
Módulo elasticidad zona 0-20 % (GPa)	\bar{x}	2,12	1,63	1,56
	SD	0,60	0,44	0,51
	CV	28,55%	26,81%	32,49%
Módulo elasticidad zona 20-80 % (GPa)	\bar{x}	4,25	3,60	3,48
	SD	1,13	1,13	1,26
	CV	26,69%	31,44%	36,24%
Módulo Tenacidad (MPa)	\bar{x}	3,60	2,37	2,03
	SD	0,98	0,65	0,64
	CV	27,17%	27,55%	31,58%

Figura 23

Curva σ vs ϵ para hilos de $L = 100$ mm

**Figura 24**

Curva σ vs ϵ para hilos de $L = 175$ mm

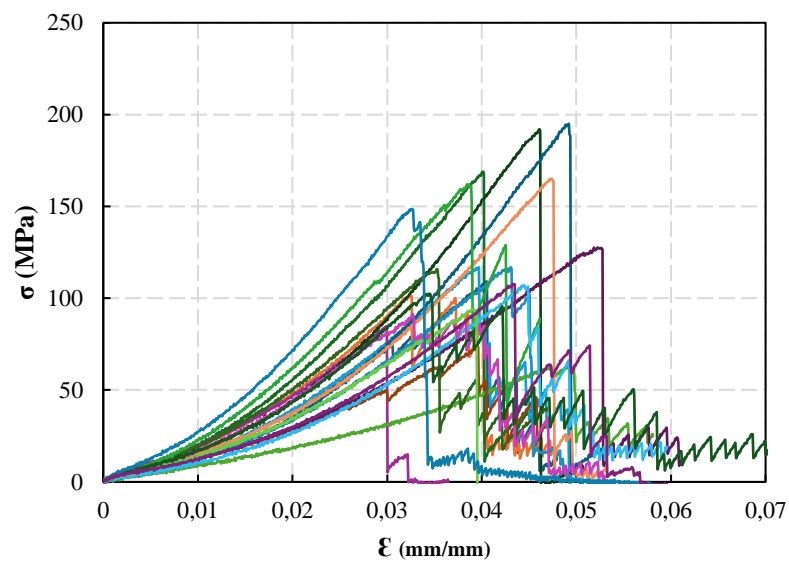
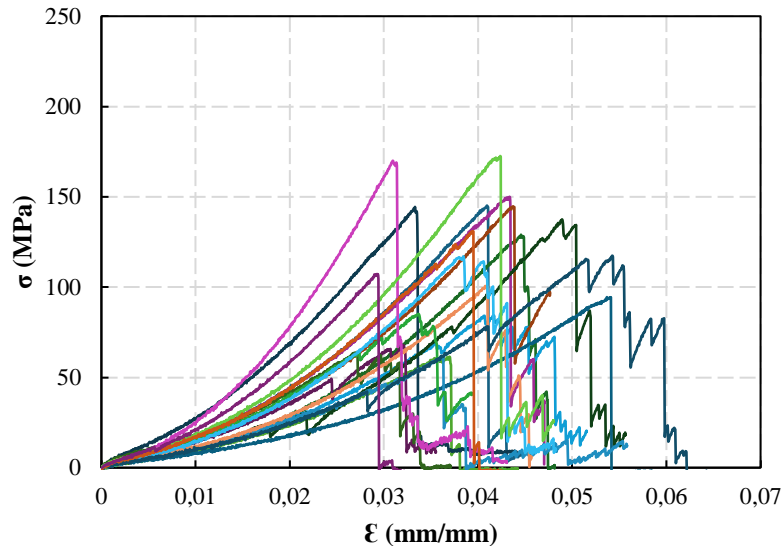


Figura 25

Curva σ vs ϵ para hilos de $L = 250$ mm



4.2.3 Módulo de tenacidad (U_t)

Los resultados promedio del módulo de tenacidad para las longitudes ensayadas se encuentran en la Tabla 4. Para una longitud de $L = 100$ mm, el módulo de tenacidad varía entre 1.82 y 5.48 MPa. En el caso de $L = 175$ mm, el rango observado es de 1.11 a 3.44 MPa. Finalmente, para $L = 250$ mm, el módulo oscila entre 0.95 y 2.97 MPa.

Teniendo en cuenta los rangos de esta propiedad en las tres longitudes ensayadas se logra apreciar que $L = 100$ mm es aquella longitud que presenta un mayor valor, siendo la longitud que mayor capacidad tiene de absorber energía antes de efectuarse la rotura del hilo.

En esta propiedad es evidente la tendencia inversa que se presenta con la longitud. Los porcentajes de disminución del módulo al pasar de $L = 100$ mm a $L = 175$ mm fue del 34.09 %, mientras que la disminución al pasar de $L = 175$ mm a $L = 250$ mm fue del 14.28 %.

4.3 Relación entre las propiedades mecánicas y la longitud del hilo

Las propiedades mecánicas a tracción calculadas en el numeral 3.4 muestran un comportamiento inverso a la longitud de probeta usada. Como se muestra en la Figura 26, Figura 27,

Figura 28, Figura 29, y Figura 30, existe un comportamiento o tendencial potencial con valores máximos hacia longitudes más cortas y con asíntota horizontal hacia longitudes más largas.

Este comportamiento puede relacionarse a la no uniformidad en la fibra a lo largo de su longitud, puesto que el contenido de celulosa en la fibra de hoja de piña varía a lo largo de esta, lo que puede alterar sus propiedades mecánicas a tracción (Anand et al., 2022a).

Por otra parte, el hilo al ser elaborado artesanalmente, en longitudes largas se presenta con más frecuencia empalmes entre fibras aumentando la probabilidad de falla en estas regiones, a diferencia de longitudes cortas donde al haber más fibras completas a lo largo de toda la longitud se presentan propiedades mecánicas más altas.

Dicha longitud de las fibras de piña está directamente relacionada por el tamaño y morfología de las hojas, puesto que estas pueden variar en longitud desde aproximadamente 20 cm hasta 100 cm, dependiendo de su posición en la planta (Bonilla Andrade, 2018) (Figura 31). Además, el método de extracción utilizado puede resultar en longitudes finales de fibra que son menores que las típicas de la hoja.

Figura 26

Relación entre σ_{max} y longitud del hilo.

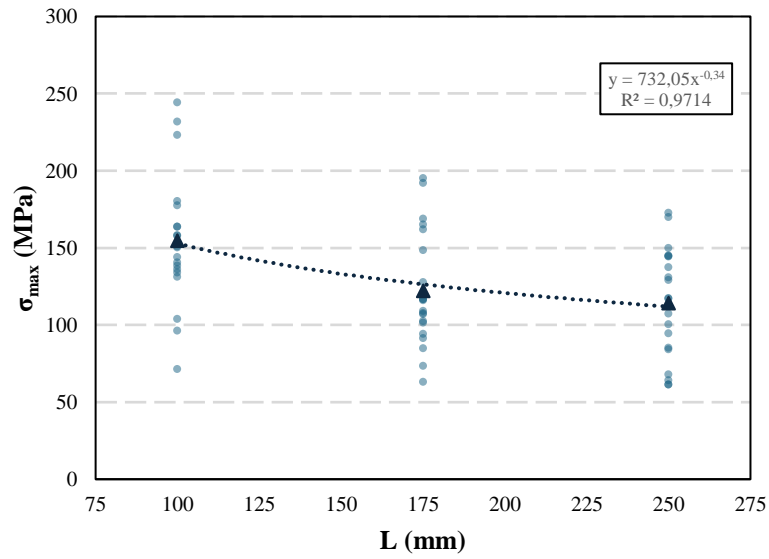


Figura 27

Relación entre ϵ_{max} y longitud del hilo.

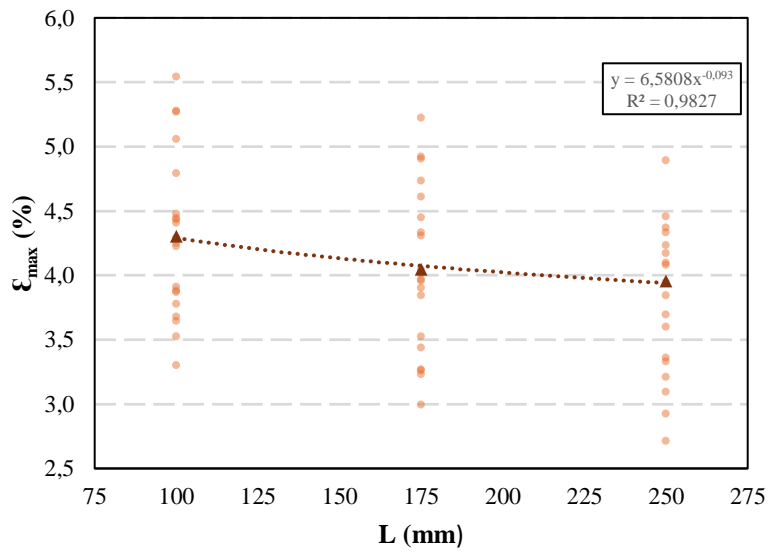


Figura 28

Relación entre $E_{(0-20\%)}$ y longitud del hilo

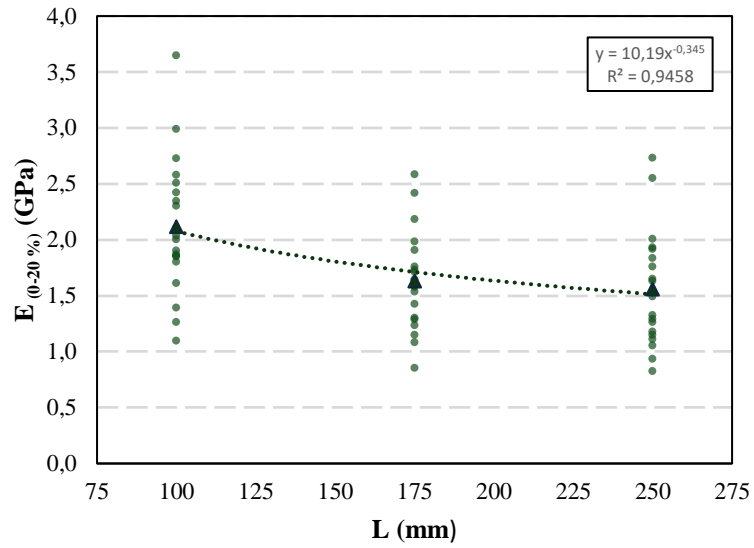


Figura 29

Relación entre $E_{(20-80\%)}$ y longitud del hilo

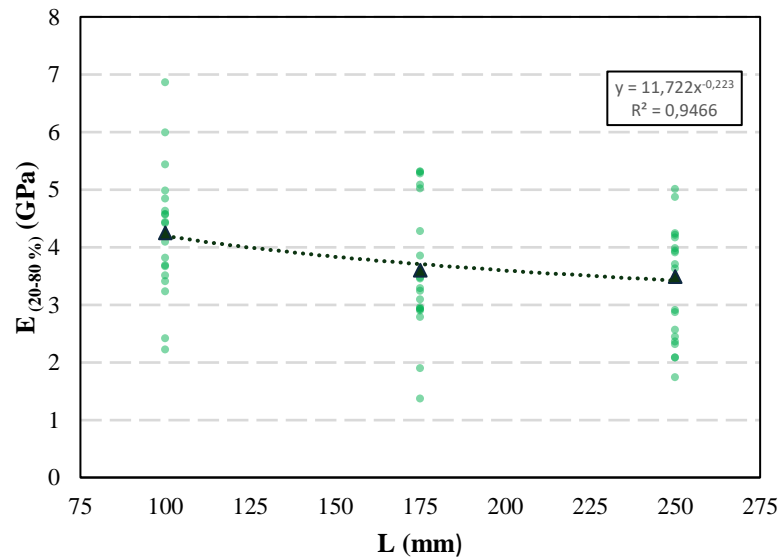


Figura 30

Relación entre U_t y longitud del hilo

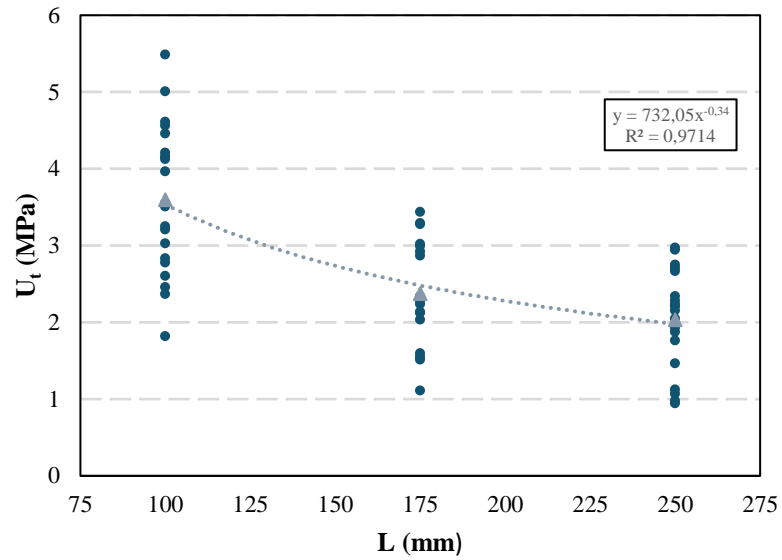
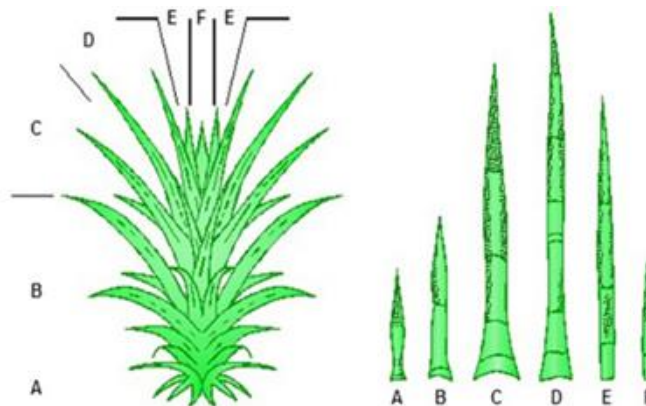


Figura 31

Clasificación de las hojas de piña



Nota. Tomado de (Leonel & dos Reis, 2012).

5. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas a partir de los resultados son:

- El rango de densidad lineal seleccionado (700-900 Tex) representa el 43 % del total de hilos artesanales tomados como muestra. La media tuvo un valor de 818 Tex con un coeficiente de variación de 25 %.
- La técnica de encapsulamiento de hilos en resina en combinación con la captura de micrografías SEM permitió calcular el área de la sección transversal de estos. Para los hilos con densidad lineal entre 700 y 900 Tex, se obtuvo un valor promedio de 0.675 ± 0.162 mm² y un diámetro aparente promedio de 0.927 ± 0.112 mm.
- La resistencia máxima, módulo de elasticidad, módulo de tenacidad y deformación unitaria máxima de los hilos de fibra de PALF estudiados oscilaron entre 61,25 y 244,23 MPa, 1.37 y 6.86 GPa, 0.95 y 5.48 MPa, 2.71 y 5,54 % respectivamente.
- Se obtuvieron disminuciones aproximadas del 26% en la resistencia, 18% en el módulo de elasticidad, 44% en el módulo de tenacidad y 8% en las deformaciones unitarias máximas al aumentar de $L = 100$ mm a $L = 250$ mm. Esta tendencia presentada en los hilos de fibra de piña indica que sus propiedades mecánicas guardan una relación inversa a la longitud del hilo.
- Los coeficientes de variación en las propiedades mecánicas oscilaron entre 15 % y 36 %. Esto puede atribuirse a la heterogeneidad de la fibra natural a lo largo de su longitud. Además, el proceso de elaboración artesanal, la zona de cultivo, método de cultivo, el tamaño de hoja de la cual se extrajo la fibra y el método de extracción empleado también influyen en esta.

6. Recomendaciones

En futuras investigaciones que relacionen la determinación de las propiedades mecánicas de hilos de fibra de piña, se recomienda trabajar con longitudes menores a 100 mm.

Se recomienda analizar la composición química de los hilos de fibra de piña en cuanto a sus porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y analizar como este puede influir en las propiedades mecánicas de los hilos de la región.

Referencias Bibliográficas

- Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. D. F. M., De Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>
- Anand, P. B., Lakshmikanthan, A., Chandrashekarappa, M. P. G., Selvan, C. P., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022a). Experimental Investigation of Effect of Fiber Length on Mechanical, Wear, and Morphological Behavior of Silane-Treated Pineapple Leaf Fiber Reinforced Polymer Composites. *Fibers*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/fib10070056>
- Anand, P. B., Lakshmikanthan, A., Chandrashekarappa, M. P. G., Selvan, C. P., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022b). Experimental Investigation of Effect of Fiber Length on Mechanical, Wear, and Morphological Behavior of Silane-Treated Pineapple Leaf Fiber Reinforced Polymer Composites. *Fibers*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/fib10070056>
- Ashadujjaman, M., Saifullah, A., Shah, D. U., Zhang, M., Akonda, M., Karim, N., & Sarker, F. (2021). Enhancing the mechanical properties of natural jute yarn suitable for structural applications. *Materials Research Express*, 8(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abfd5e>
- Asim, M., Jawaid, M., Abdan, K., & Ishak, M. R. (2017). Effect of pineapple leaf fibre and kenaf fibre treatment on mechanical performance of phenolic hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 18(5), 940–947. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-1236-0>
- ASTM. (2022, September 6). *D2256/D2256M Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*. https://www.astm.org/d2256_d2256m-21.html

- BEER, F., & JOHNSTON, R. (2009). *Mecanica_de_Materiales_5ta_Ed_Beer_Johns*.
- Belgorodski, N., Greiner, M., Tolksdorf, K., Shueller, K., Flor, M., & Gohring, L. (2017). *Fitting Distributions to Given Data or Known Quantiles [R package rriskDistributions version 2.1.2]*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.PACKAGE.RRISKDISTRIBUTIONS>
- Besserer, H., Nürnberger, F., & Maier, H. J. (n.d.-a). *Comparison of the Mechanisms of Void Formation*.
- Besserer, H., Nürnberger, F., & Maier, H. J. (n.d.-b). *Tensile properties of epoxy composites reinforced with continuous palm fibers*.
- Betancourt, C. (2017). *UTILIZACIÓN DE FIBRAS DE HOJA DE PIÑA COMO REFUERZO PARA BIOCOPUESTOS FABRICADOS POR MOLDEO DECOMPRESIÓN*.
- Bonilla Andrade, N. M. (2018). *Elaboración de un no tejido a partir de la fibra de piña mediante la técnica del punzonado para obtener un producto similar al cuero en cuanto a su textura y apariencia*.
- Camargo Mendez, M. A., & Garcia Alfonso, D. F. (2017). *Material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales para la fabricación de tenso-estructuras*.
- Corbin, A. C., Soulat, D., Ferreira, M., Labanieh, A. R., Gabrion, X., & Placet, V. (2018). Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 406(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012016>
- Datos Abiertos. (2022). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA | Datos Abiertos Colombia*. <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge>

- Esguerra, Y., & Forero, L. (2020). Caracterización de propiedades mecánicas de fibras naturales para usos en concretos hidráulicos. *Universidad de Cartagena*.
- FAO. (n.d.). *Future Fibres: ¿Por qué fibras del futuro?* Retrieved May 6, 2023, from <https://www.fao.org/economic/futurefibres/pagina-principal-de-fibras-del-futuro/why/es/>
- FAOSTAT. (n.d.). *FAOSTAT*. Retrieved May 6, 2023, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Fernández Rojas, M. (2018). *Desarrollo de biocompositos basados en poliuretano, fibras naturales y líquidos iónicos como materiales sostenibles para aplicaciones industriales*.
- Flores Cebrián, L. (2009). *Análisis Estadístico Descriptivo*.
- Gahgah, M., Belaadi, A., Boumaaza, M., Alshahrani, H., & Khan, M. K. A. (2023). Effect of Number of Tests on the Mechanical Characteristics of Agave sisalana Yarns for Composites Structures: Statistical Approach. *Polymers*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/polym15132885>
- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J. V., Osorio, M., Montoya, Ú., Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (2017). *CELULOSA: UN POLÍMERO DE SIEMPRE CON MUCHO FUTURO*.
- Glória, G. O., Altoé, G. R., Moraes, Y. M., Netto, P. A., Margem, F. M., & Monteiro, S. N. (2015). *Evaluation of palm fibers elasticity modulus with different diameters by weibull analysis*.
- GUARNIZO, A., MARTINES, P., & VALENCIA, H. (2009). PRETRATAMIENTOS DE LA CELULOSA Y BIOMASA PARA LA SACARIFICACIÓN. *Universidad Tecnológica de Pereira*.

- Gutiérrez, A., Guirola, C., Armas, A., Albernas, Y., & Villanueva, G. (2020). VALORIZACIÓN DE LA LIGNINA EN EL CONCEPTO DE BIORREFINERÍA (I). *Revista Centro Ayúcan*.
- Hidalgo Salazar, M. A., & Betancourt Sanchez, C. E. (2017). *Utilización de fibras de hoja de piña como refuerzo para biocompuestos fabricados por moldeo de compresión*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Jain, J., & Sinha, S. (2022a). Pineapple Leaf Fiber Polymer Composites as a Promising Tool for Sustainable, Eco-friendly Composite Material: Review. In *Journal of Natural Fibers* (Vol. 19, Issue 15, pp. 10031–10052). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1993478>
- Jain, J., & Sinha, S. (2022b). Potential of Pineapple Leaf Fibers and Their Modifications for Development of Tile Composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 4822–4834. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1870629>
- Jain, J., Sinha, S., & Jain, S. (2021a). Compendious Characterization of Chemically Treated Natural Fiber from Pineapple Leaves for Reinforcement in Polymer Composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(6), 845–856. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1658256>
- Jain, J., Sinha, S., & Jain, S. (2021b). Compendious Characterization of Chemically Treated Natural Fiber from Pineapple Leaves for Reinforcement in Polymer Composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(6), 845–856. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1658256>

- Jawaid, M., Asim, M., Tahir, P. M., & Nasir, M. (n.d.). *Green Energy and Technology Pineapple Leaf Fibers Processing, Properties and Applications*.
<http://www.springer.com/series/8059>
- Jawaid, M., Asim, M., Tahir, P. M., & Nasir, M. (2020). *Green Energy and Technology Pineapple Leaf Fibers Processing, Properties and Applications*.
<http://www.springer.com/series/8059>
- Kasim, A. N., Selamat, M. Z., Daud, M. A. M., Yaakob, M. Y., Putra, A., & Sivakumar, D. (2016). Mechanical properties of polypropylene composites reinforced with alkaline treated pineapple leaf fibre from josapine cultivar. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *13*(1), 3157–3167.
<https://doi.org/10.15282/ijame.13.1.2016.3.0263>
- Laverde Sarmiento, V. (2023). *REFUERZO EXTERNO DE CILINDROS DE CONCRETO CON FIQUE 1 Respuesta a Compresión del Concreto Simple Reforzado Externamente con Mallas de Fibra de Fique Presentado por*.
- Laverde Sarmiento, V., Benjumea Royero, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2023). *Respuesta a Compresión del Concreto Simple Reforzado Externamente con Mallas de Fibra de Fique*.
- Leonel, S., & dos Reis, L. L. (2012). Potassium Fertilization on Fruits Orchards: A Study Case from Brazil. In *Soil Fertility*. InTech. <https://doi.org/10.5772/53210>
- Madueke, C. I., Mbah, O. M., & Umunakwe, R. (2023). A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. In *Polymer Bulletin* (Vol. 80, Issue 4, pp. 3489–3506). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y>

- Maria, C., & Diego, G. (2017). *MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMERICA REFORZADO CON FIBRAS NATURALES PARA LA FABRICACIÓN DE TENSO-ESTRUCTURAS*.
- Martínez Suárez, C., Rojas Montejo, P., & Gutiérrez Junco, O. (2021). Effects of alkaline treatments on natural fibers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012056>
- MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico*. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Metalinspec. (2022). *Microscopio electrónico de barrido: Qué es y cómo funciona*.
- ONU. (n.d.). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible*. Retrieved May 6, 2023, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Penagos Santana, Y. A. (2021). *Caracterización fisicoquímica y funcionalidad tecnológica de la fibra de piña (Ananas Comosus), cultivada en la vereda Acapulco- Girón (Santander)* [Universidad Santo Tomás].
<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/35510>
- Rivas Siota, S. (2014). *VALORIZACIÓN DE HEMICELULOSAS DE BIOMASA VEGETAL INTERNATIONAL DOCTORAL THESIS BIOMASS HEMICELLULOSE VALORIZATION*.
- Rizal, M. Z. M., & Hamdan, A. (2021). Investigation of Single Fibre Tensile Properties of the Pineapple Leaf (PALF). *Journal of Physics: Conference Series*, 2129(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2129/1/012078>

Rodríguez, J. (2020). *Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras*.

Rodríguez Ofelia Andrea, V., Andrade José, T., Valle Mojica José Francisco, D., Martínez Alberto, S., & Gamboa Caupolicán, M. (2014). DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SOBRE CARGAS AXIALES DE UNA RAÍZ TROPICAL. *Congreso Internacional En Ingeniería Electrónica. Mem. Electro*, 36, 82–85. http://depi.itchiuhua.edu.mx/display/memorias_electro/MemoriaElectro2014

RStudio Desktop. (n.d.). Retrieved September 13, 2024, from <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>

Russell C. Hibbeler. (2011). *Mecánica de Materiales_8 Edicion_Russell*. 8.

Saha, A., Kumar, S., & Kumar, A. (2021). Influence of pineapple leaf particulate on mechanical, thermal and biodegradation characteristics of pineapple leaf fiber reinforced polymer composite. *Journal of Polymer Research*, 28(2). <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02435-y>

Sandoval Barrantes, M., Picado Sandí, E., Marianelly Esquivel Alfaro, T., Dra Belkis Sulbarán Coromoto Rangel, A., Lic Karla Ramírez Amador, A., Giovanni Sáenz-Arce, L., & Bach Kenly Yoel Araya Chavarría, P. (2021). *Nanofibrilación de celulosa extraída a partir del rastrojo de la piña (Ananas comosus)*.

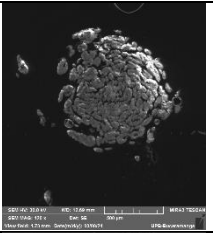
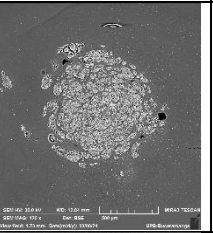
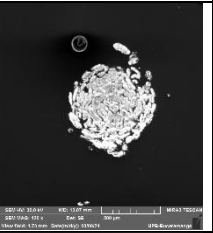
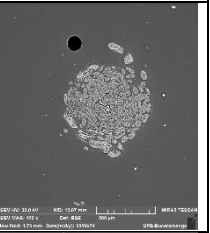
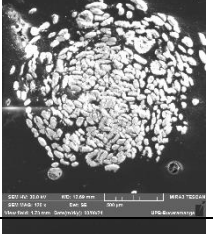
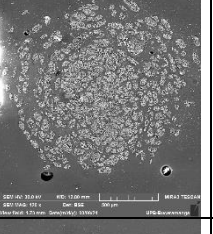
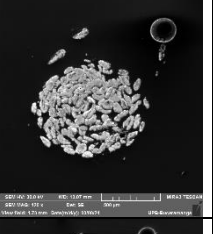
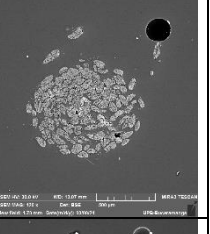
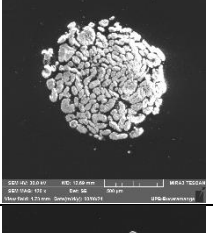
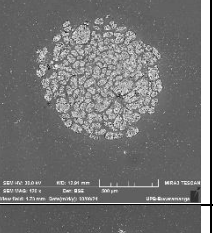

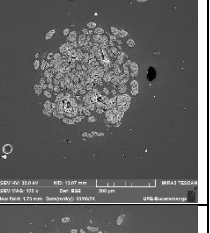
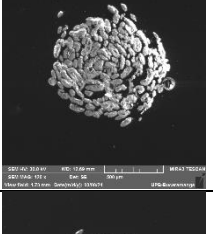
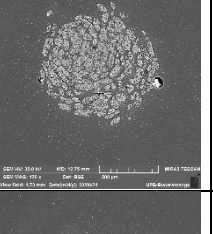
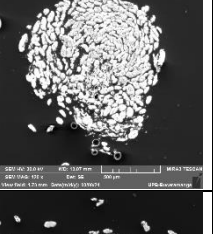
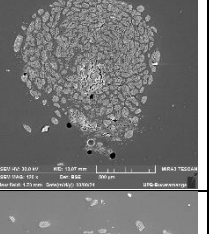
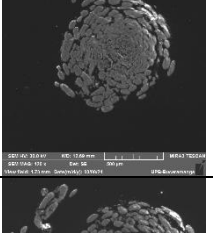
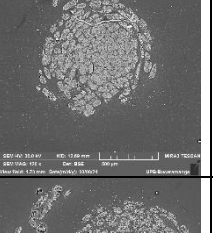
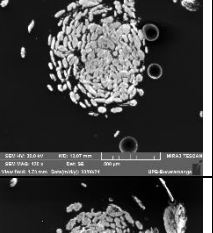
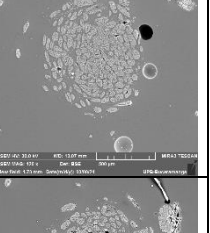
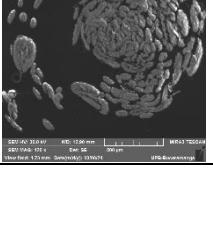
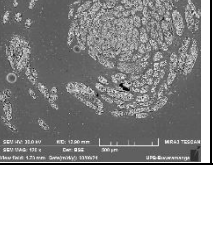
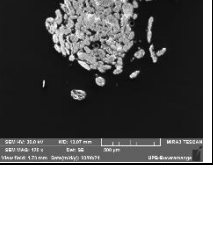
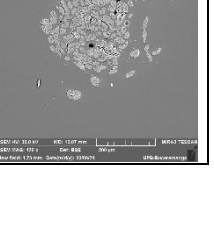
Sena Neto, A. R., Araujo, M. A. M., Barboza, R. M. P., Fonseca, A. S., Tonoli, G. H. D., Souza, F. V.D., Mattoso, L. H. C., & Marconcini, J. M. (2015). Comparative study of 12 pineapple leaf fiber varieties for use as mechanical reinforcement in polymer composites. *Industrial Crops and Products*, 64, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.042>

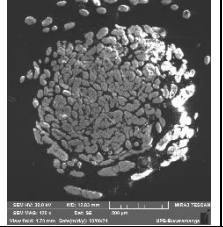
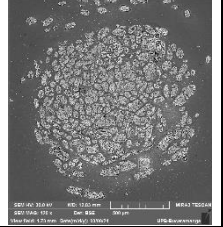
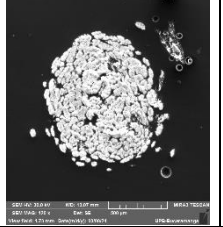
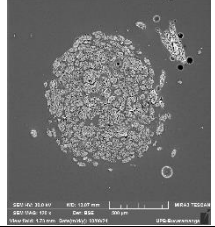
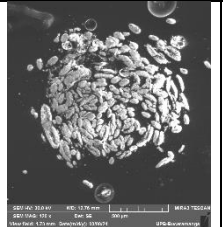
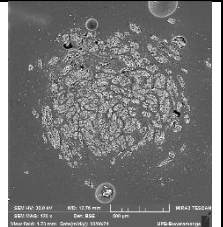
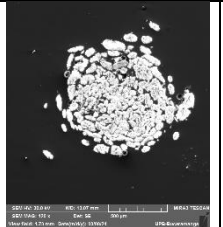
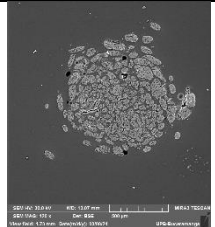
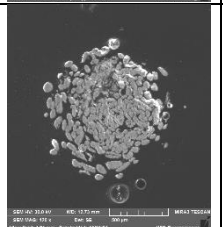
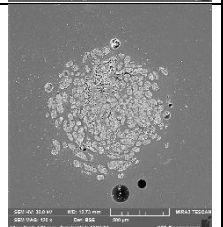
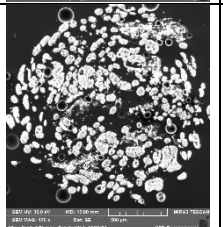
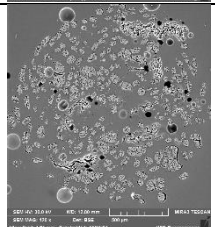
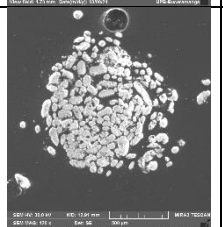
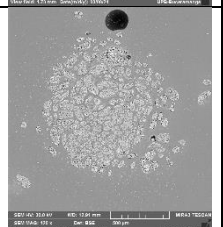
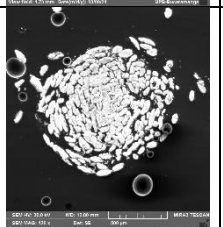
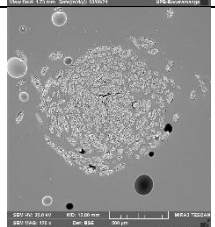
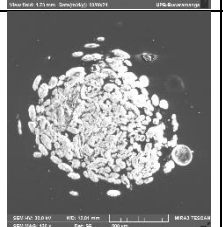
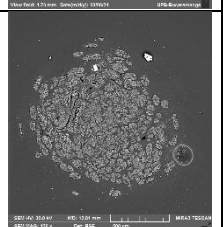
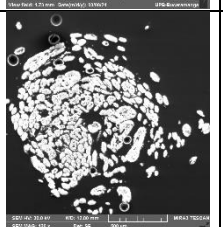
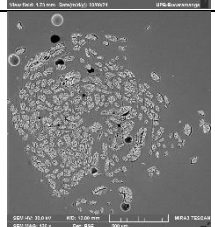
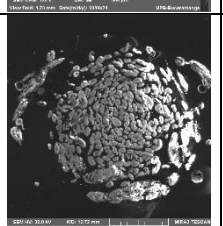
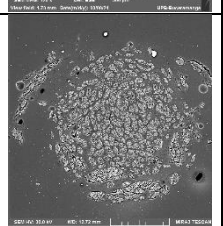
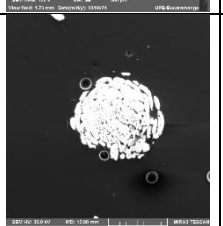
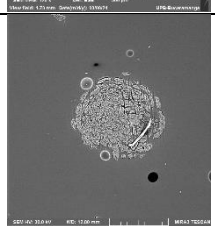
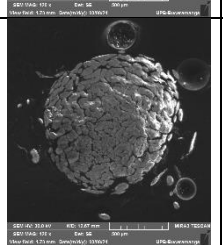
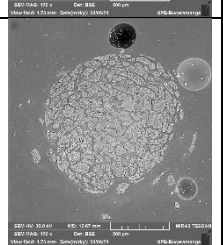
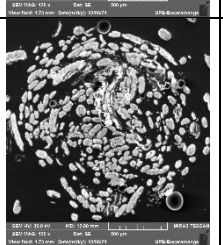
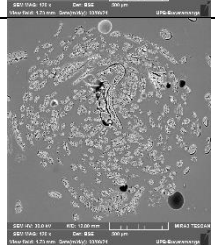
- Sena Neto, A. R., Araujo, M. A. M., Souza, F. V.D., Mattoso, L. H. C., & Marconcini, J. M. (2013). Characterization and comparative evaluation of thermal, structural, chemical, mechanical and morphological properties of six pineapple leaf fiber varieties for use in composites. *Industrial Crops and Products*, 43(1), 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.001>
- Sia, C. V., Wong, J. S. Y., Thangavelu, S. K., Chong, K. H., & Joseph, A. (2021). Weibull strength analysis of pineapple leaf fiber. *Materials Science Forum*, 1030 MSF, 45–52. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1030.45>
- Todkar, S. S., & Patil, S. A. (2019). Review on mechanical properties evaluation of pineapple leaf fibre (PALF) reinforced polymer composites. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 174). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106927>
- Tomczak, F., Satyanarayana, K. G., & Sydenstricker, T. H. D. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III - Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(10), 2227–2236. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.005>
- UPV. (2020). *Microscopia electrónica de barrido : Servicio de Microscopía Electrónica : UPV*. <https://www.upv.es/entidades/SME/info/753120normalc.html>
- Vinod, B., & Sudev, L. J. (2022). Effect of cryogenic treatment on mechanical behavior of PALF reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 64, 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.692>
- Xunta de Galicia. (2014). *ANÁLISIS DESCRIPTIVO*. <http://dxsp.sergas.essoporte.epidat@sergas.es>

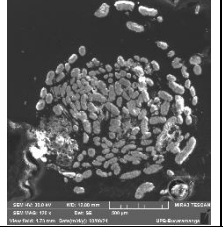
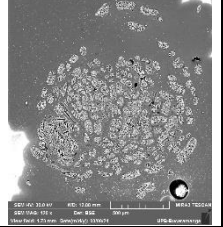
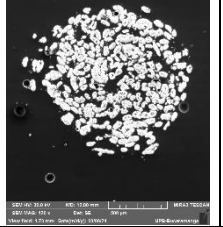
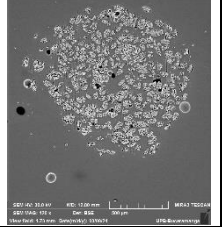
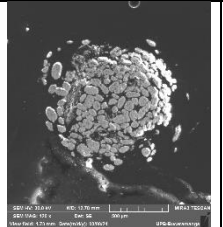
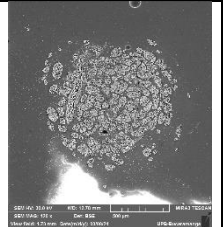
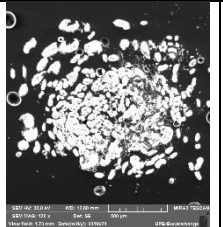
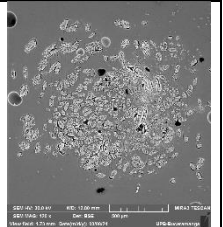
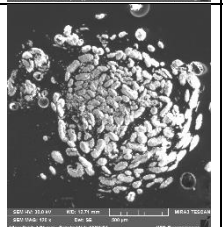
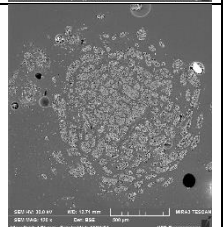
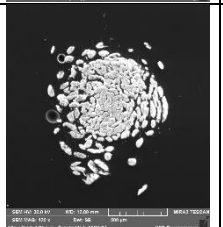
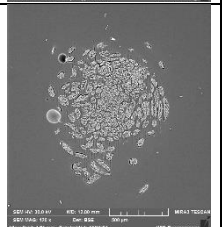
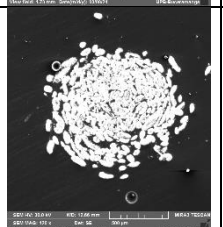
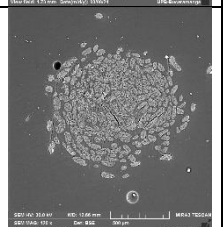
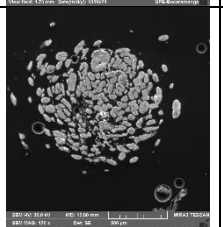
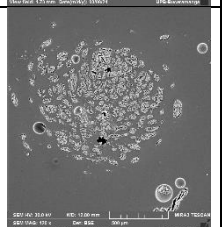
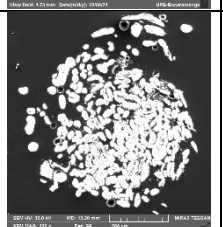
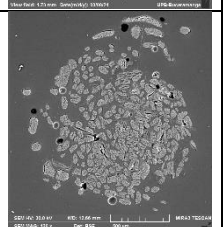
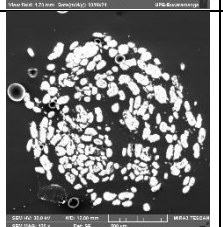
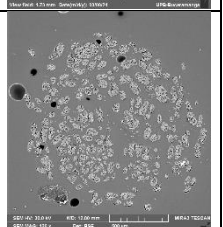
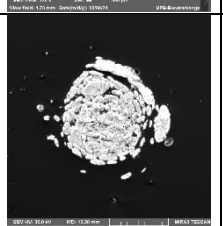
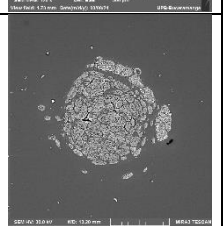
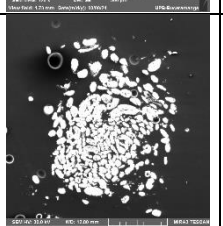
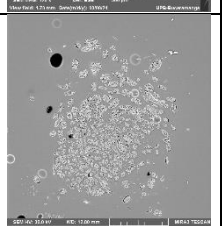
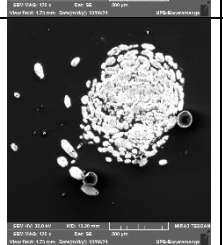
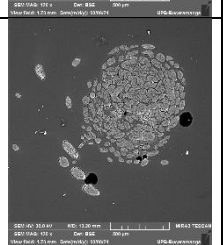
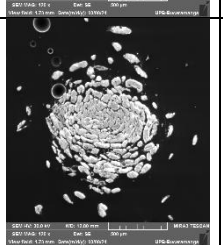
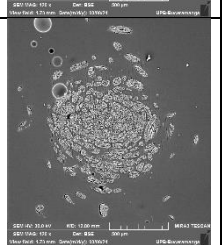
Yusof, Y., Yahya, S. A., & Adam, A. (2015). Novel Technology for Sustainable Pineapple Leaf Fibers Productions. *Procedia CIRP*, 26, 756–760.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.07.160>

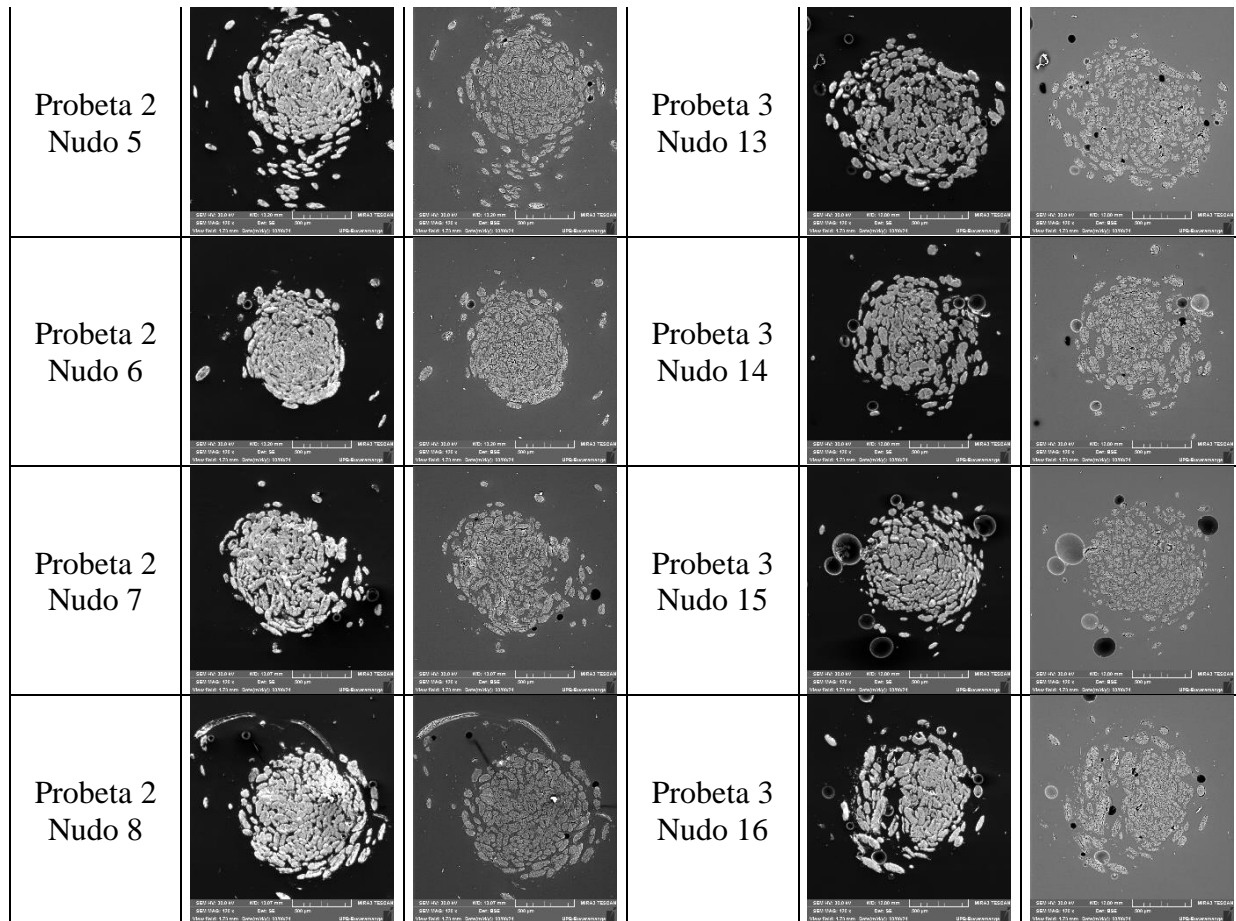
Apéndices

Apéndice A. Micrografías tomadas a los 48 hilos encapsulados.

Micrografía	Formato SE	Formato BSE	Micrografía	Formato SE	Formato BSE
Probeta 1 Nudo 1			Probeta 2 Nudo 9		
Probeta 1 Nudo 2			Probeta 2 Nudo 10		
Probeta 1 Nudo 3			Probeta 2 Nudo 11		
Probeta 1 Nudo 4			Probeta 2 Nudo 12		
Probeta 1 Nudo 5			Probeta 2 Nudo 13		
Probeta 1 Nudo 6			Probeta 2 Nudo 14		

<p>Probeta 1 Nudo 7</p>			<p>Probeta 2 Nudo 15</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 8</p>			<p>Probeta 2 Nudo 16</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 9</p>			<p>Probeta 3 Nudo 1</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 10</p>			<p>Probeta 3 Nudo 2</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 11</p>			<p>Probeta 3 Nudo 3</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 12</p>			<p>Probeta 3 Nudo 4</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 13</p>			<p>Probeta 3 Nudo 5</p>		

<p>Probeta 1 Nudo 14</p>			<p>Probeta 3 Nudo 6</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 15</p>			<p>Probeta 3 Nudo 7</p>		
<p>Probeta 1 Nudo 16</p>			<p>Probeta 3 Nudo 8</p>		
<p>Probeta 2 Nudo 1</p>			<p>Probeta 3 Nudo 9</p>		
<p>Probeta 2 Nudo 2</p>			<p>Probeta 3 Nudo 10</p>		
<p>Probeta 2 Nudo 3</p>			<p>Probeta 3 Nudo 11</p>		
<p>Probeta 2 Nudo 4</p>			<p>Probeta 3 Nudo 12</p>		



Apéndice B. Código empleado para análisis de intensidades.

```

clc,
clear,
close all;
imageFolder = 'IMAGENES/';
imagefiles = dir([imageFolder, '*.tif']);
nfiles = length(imagefiles);    % Number of files found
for ii=1:nfiles
% Read data
currentfilename = imagefiles(ii).name;
img = imread([imageFolder, currentfilename]);
% Preprocess data
img = img(1:768, :);    % Choose region of interest (ROI)
% Análisis de intensidad
% Calcula los valores mínimo y máximo de intensidad
intensidad_minima = double(min(img(:)));

```

```

intensidad_maxima = double(max(img(:)));
% Calcula el histograma de intensidad para el área seleccionada
[histograma, intensidades] = imhist(img);
% Calcula estadísticas descriptivas para el área seleccionada
media = mean(img(:));
mediana = median(img(:));
desviacion_estandar = std(double(img(:)));
% Visualiza el histograma y la escala de colores
figure;
% Histograma
bar(intensidades, histograma);
title(currentfilename);
xlabel('Valor de Intensidad');
ylabel('Frecuencia');
xlim([0 65535]);
ylim([0 20000]);
% Añadir línea para la media en el histograma
hold on;
line([mediana, mediana], ylim, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1);
line([media, media], ylim, 'Color', 'g', 'LineWidth', 1);
line([media+desviacion_estandar, media+desviacion_estandar], ylim,
'Color', 'b', 'LineWidth', 1);
line([media-desviacion_estandar, media-desviacion_estandar], ylim,
'Color', 'y', 'LineWidth', 1);
hold off;
print('-dpng', ['Histograma ', currentfilename]);
end

```

Apéndice C. Código empleado para cálculo de áreas.

```

clc;
clear;
close all;
% Cargar umbrales desde el archivo Excel
umbralesTable = readtable('umbrales.xlsx');
umbrales = umbralesTable.Umbrales; % Suponiendo que la columna se llama
'Umbral'
imageFolder = 'IMAGENES/';
imagefiles = dir([imageFolder, '*.tif']);
nfiles = length(imagefiles); % Number of files found
areas = cell(nfiles, 4); % First column for filename, second for area
in pixels, third for area in mm^2
for ii = 1:nfiles
    % Read data

```

```

currentfilename = imagefiles(ii).name;
img = imread([imageFolder, currentfilename]);
% Preprocess data
img = img(1:768, :); % Choose region of interest (ROI)
% Show the image for user to select a region for area calculation
imshow(img);
title('Selecciona una región para analizar el área');
h = impoly;
wait(h);
% Get coordinates of the polygon selected for area calculation
mask = createMask(h);
% Create a mask to black out the outside of the selected polygon
mascara_negra = uint8(~mask) * 255;
img(mascara_negra == 255) = 0;
% Define threshold to classify dark and bright regions using the
loaded threshold
umbral = umbrales(ii); % Use the corresponding threshold for this
image
% Classify pixels into dark and bright regions
region_oscura = img <= umbral;
region_clara = img > umbral;
% Create an image to visualize dark and bright regions
imagen_dividida = uint8(zeros(size(img)));
imagen_dividida(region_oscura) = 0; % Dark pixels
imagen_dividida(region_clara) = 255; % Bright pixels
imshow(imagen_dividida);
title(currentfilename);
% Label bright regions
[L, Ne] = bwlabel(imagen_dividida);
% Calculate area of labeled bright regions
propied = regionprops(L);
% Find areas larger than 100 pixels (adjust as necessary)
s = find([propied.Area] > 100);
% Calculate the final area in pixels
Area_pixeles = sum([propied(s).Area]);
% Image scale
Longitud_en_pixeles = 222;
Longitud_en_mm = 0.5;
Resolucion = Longitud_en_pixeles / Longitud_en_mm;
% Calculate the final area in mm^2
Area_mm_2 = Area_pixeles / (Resolucion^2);
% Store areas in the matrix
areas{ii, 1} = currentfilename;
areas{ii, 2} = Area_pixeles;

```

```

areas{ii, 3} = Area_mm_2;
areas{ii, 4} = umbrales(ii);
% Save the processed image as PNG
print('-dpng', currentfilename);
end

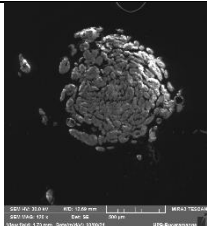
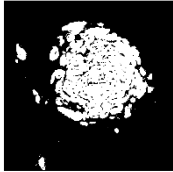
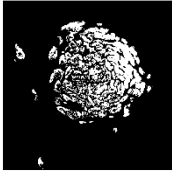
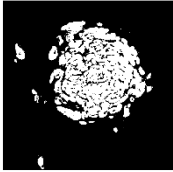
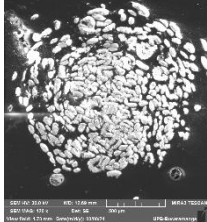
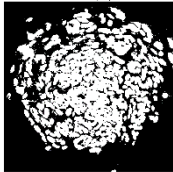
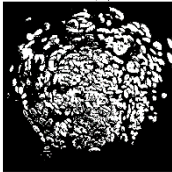
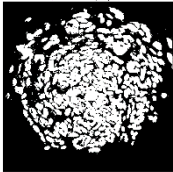
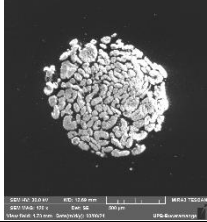
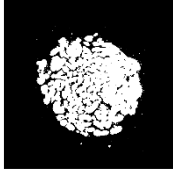
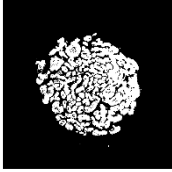
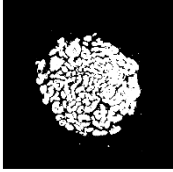
```

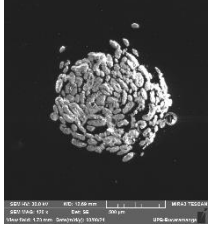
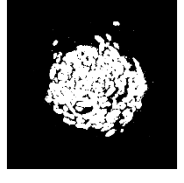
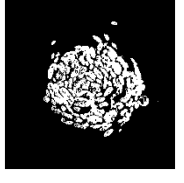
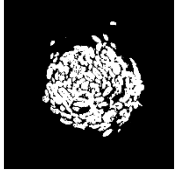
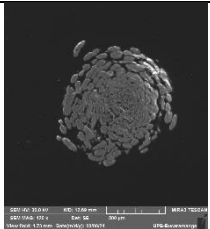
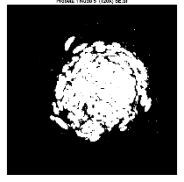
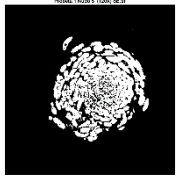
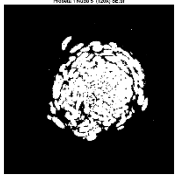
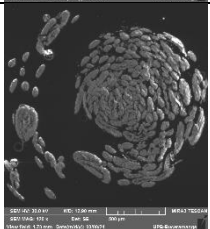
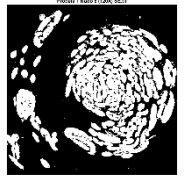
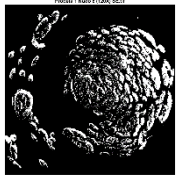
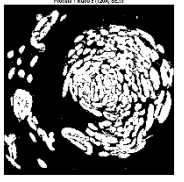
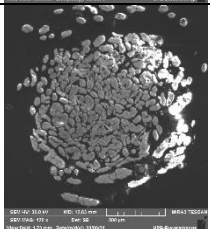
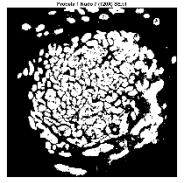
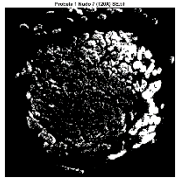
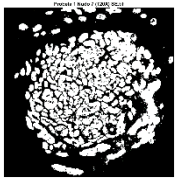
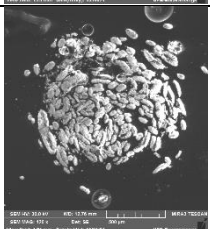
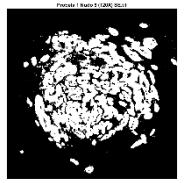
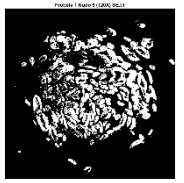
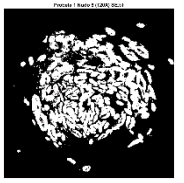
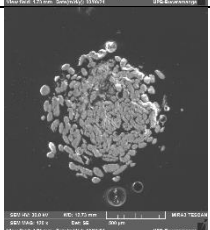
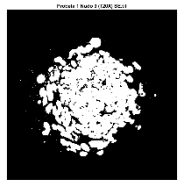
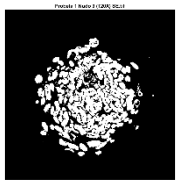
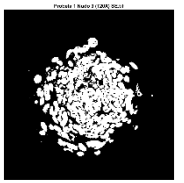
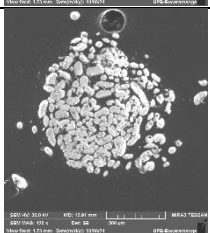
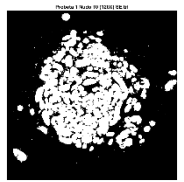
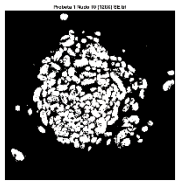
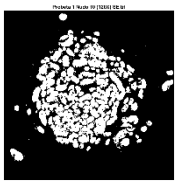
Apéndice D. Umbrales para el cálculo de área.

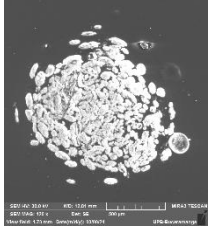
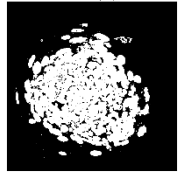
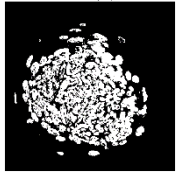
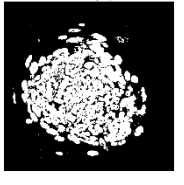
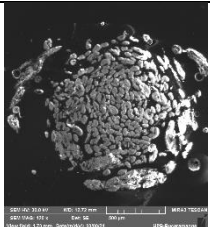
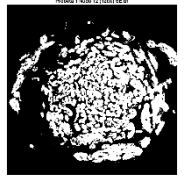
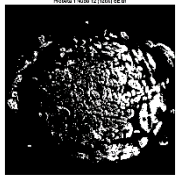
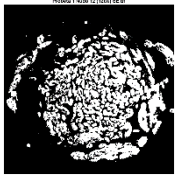
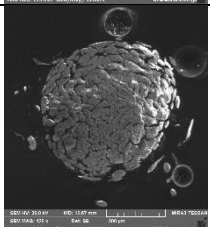
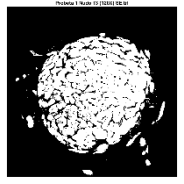

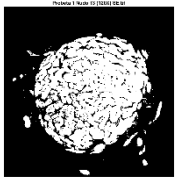
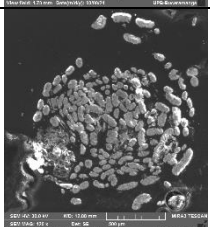
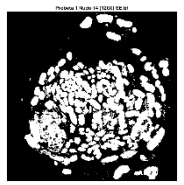
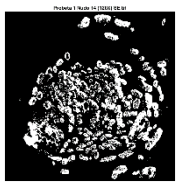
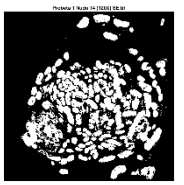
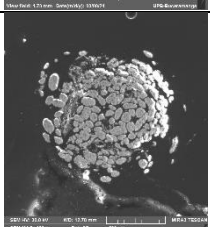
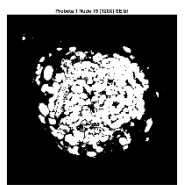
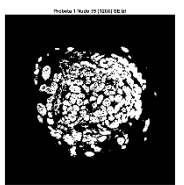
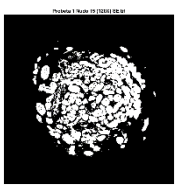
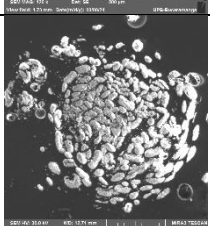
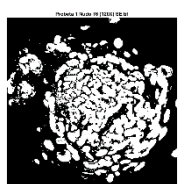
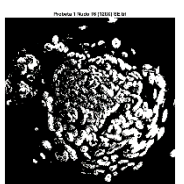
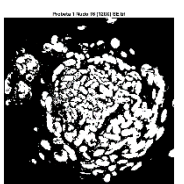
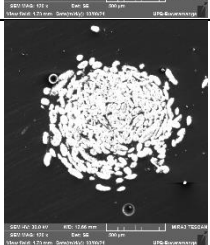
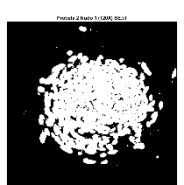
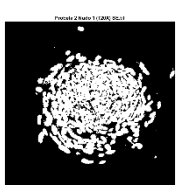
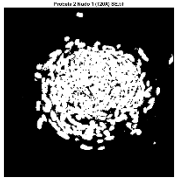
Micrografía	Media	Mediana	Desviación estándar	Punto de intersección
Probeta 1 Nudo 1	10224	6140	9145	13017
Probeta 1 Nudo 2	31692	19572	21157	37008
Probeta 1 Nudo 3	20304	11345	17221	30583
Probeta 1 Nudo 4	14829	8459	13882	22873
Probeta 1 Nudo 5	12328	9232	6685	15420
Probeta 1 Nudo 6	16775	11453	8798	17733
Probeta 1 Nudo 7	22795	14802	13779	23644
Probeta 1 Nudo 8	25319	16124	15723	31611
Probeta 1 Nudo 9	21666	16628	9972	28527
Probeta 1 Nudo 10	29400	20691	15257	39835
Probeta 1 Nudo 11	32460	21168	17501	40349
Probeta 1 Nudo 12	18961	10447	15230	22873
Probeta 1 Nudo 13	15606	9969	10261	15934
Probeta 1 Nudo 14	21324	14181	12595	26471
Probeta 1 Nudo 15	22215	15598	12578	31097
Probeta 1 Nudo 16	28030	16901	17629	33667
Probeta 2 Nudo 1	24826	11079	22624	38807
Probeta 2 Nudo 2	29680	13308	23509	44975
Probeta 2 Nudo 3	15491	6555	19508	28013
Probeta 2 Nudo 4	18138	7183	21572	29298
Probeta 2 Nudo 5	17619	5453	19842	26738
Probeta 2 Nudo 6	13970	5158	17114	19018
Probeta 2 Nudo 7	15154	5643	18540	23901
Probeta 2 Nudo 8	18401	7000	19893	28013
Probeta 2 Nudo 9	13389	7503	16199	25186
Probeta 2 Nudo 10	10747	4648	14727	25440
Probeta 2 Nudo 11	12016	5361	15963	25186
Probeta 2 Nudo 12	25088	11002	21944	39321
Probeta 2 Nudo 13	13983	5861	16988	28013
Probeta 2 Nudo 14	12347	5759	15309	22102
Probeta 2 Nudo 15	21568	9266	21080	29555

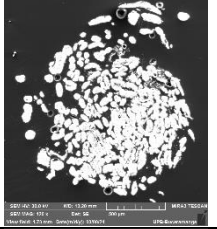
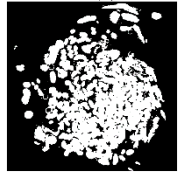
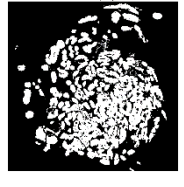
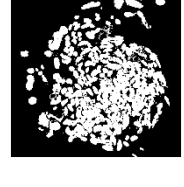
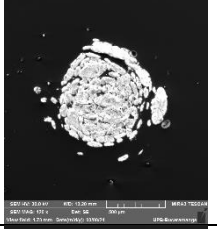

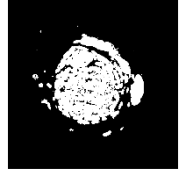
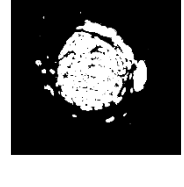
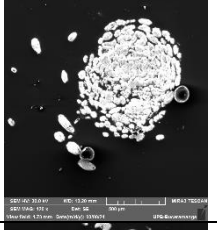
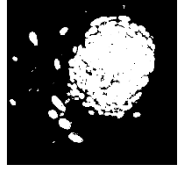
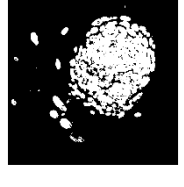
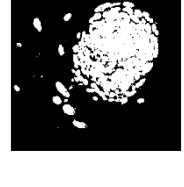
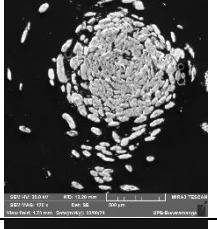
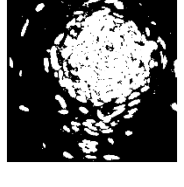
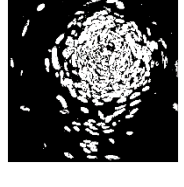
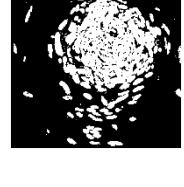
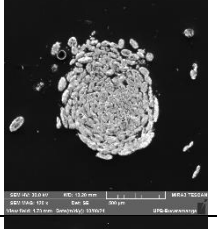
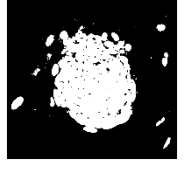
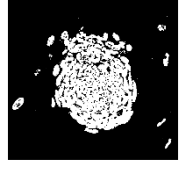
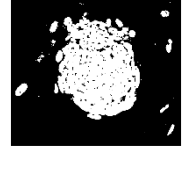
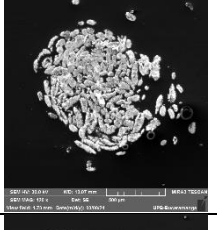
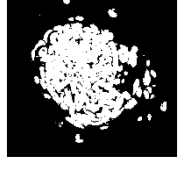
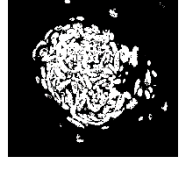
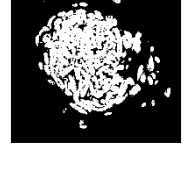
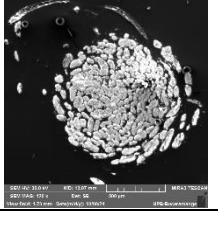
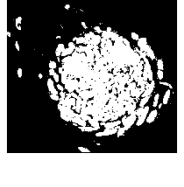
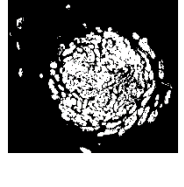
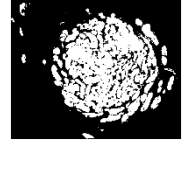
Probeta 2 Nudo 16	20475	9897	20120	32125
Probeta 3 Nudo 1	26880	11973	22405	40863
Probeta 3 Nudo 2	22715	9687	22299	38550
Probeta 3 Nudo 3	25637	11180	22658	43433
Probeta 3 Nudo 4	17091	10680	17631	43433
Probeta 3 Nudo 5	22451	8904	20498	33153
Probeta 3 Nudo 6	22513	9696	22347	45746
Probeta 3 Nudo 7	26967	11561	23337	48830
Probeta 3 Nudo 8	17557	8943	18239	33410
Probeta 3 Nudo 9	12862	6266	13482	27242
Probeta 3 Nudo 10	26291	13295	21728	47963
Probeta 3 Nudo 11	23926	13578	20258	51914
Probeta 3 Nudo 12	16458	6690	18561	26985
Probeta 3 Nudo 13	13542	4450	15378	23130
Probeta 3 Nudo 14	11437	4460	13542	22616
Probeta 3 Nudo 15	12542	4885	15226	23387
Probeta 3 Nudo 16	14067	5282	16898	28270

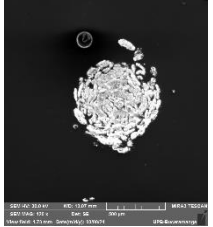
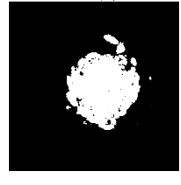
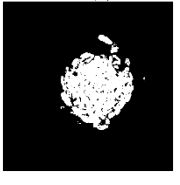

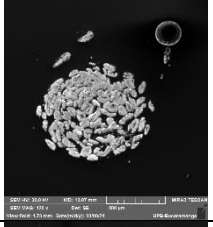
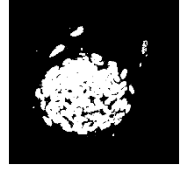
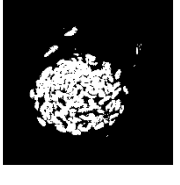
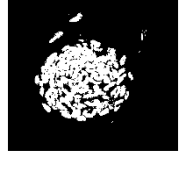
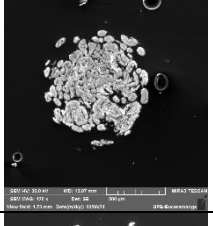
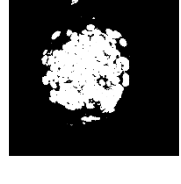
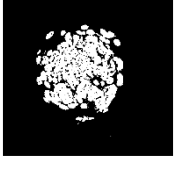
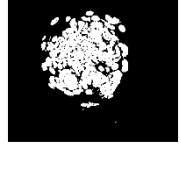
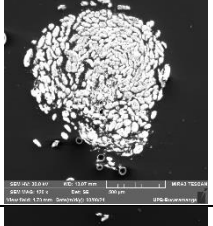
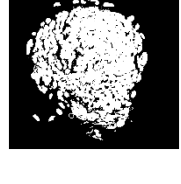
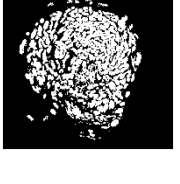
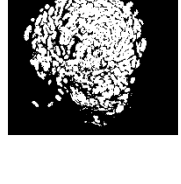
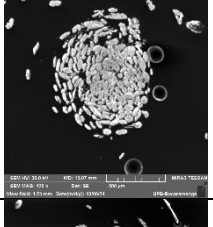
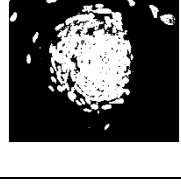
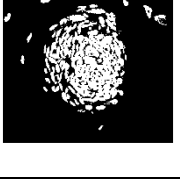
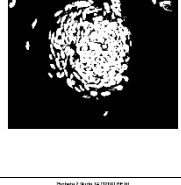
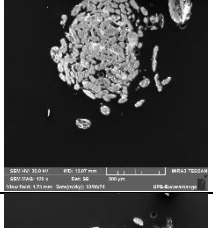
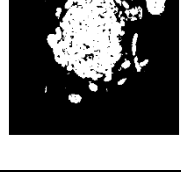
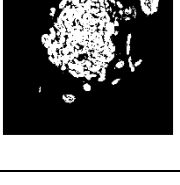
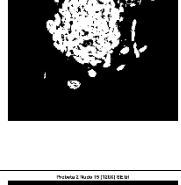
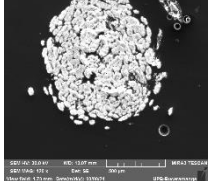
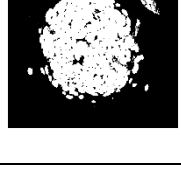
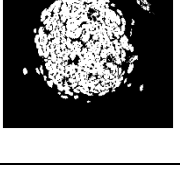
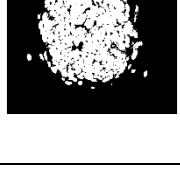
Apéndice E. Micrografías binarizadas con cada umbral

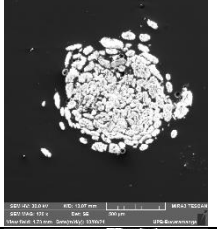
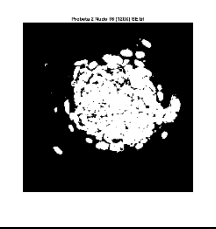
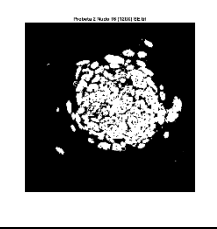
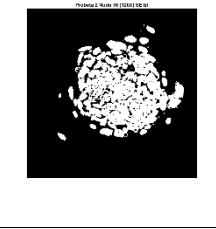
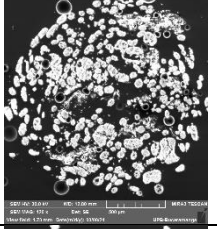
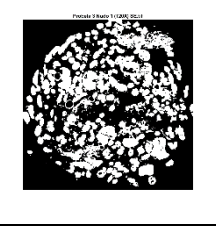
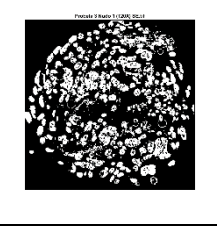
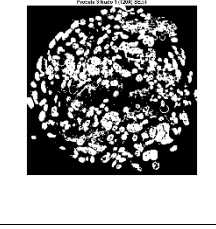
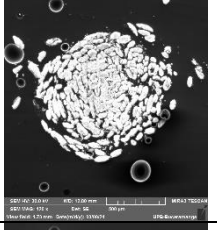
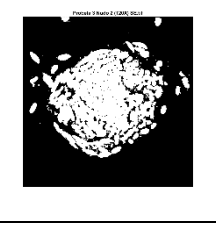
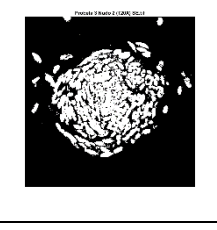
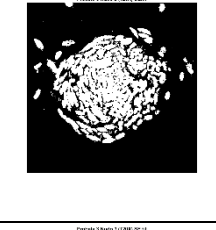
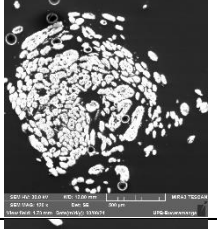
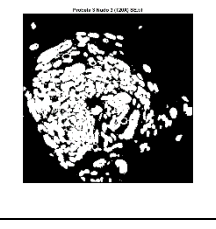
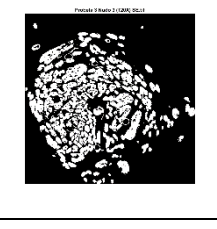
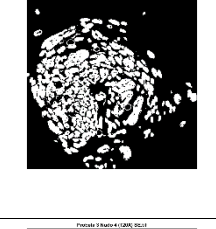
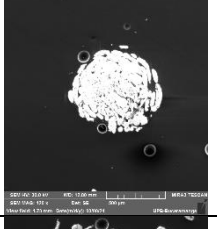
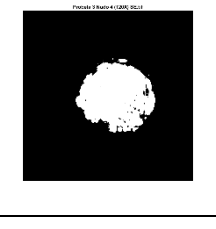
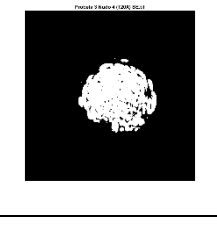
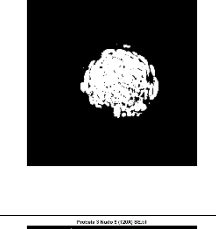
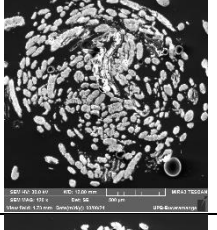
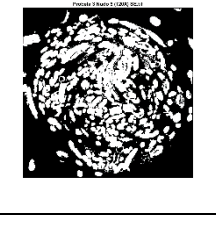
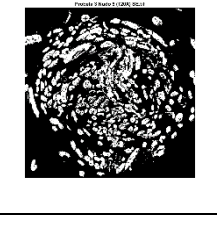
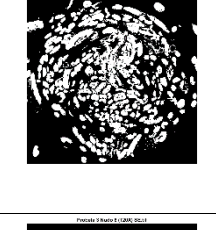
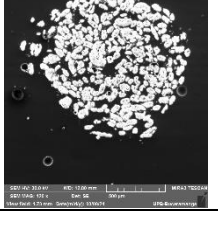
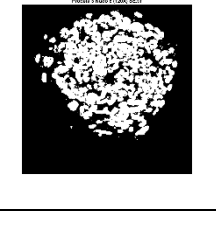
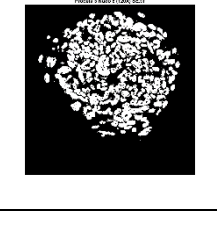
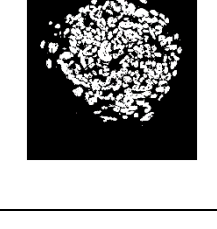
Hilo	Micrografía	Área umbral Media	Área umbral Media + SD	Área umbral Punto de intersección
Probeta 1 Nudo 1				
Probeta 1 Nudo 2				
Probeta 1 Nudo 3				

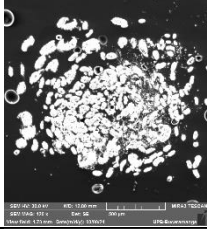
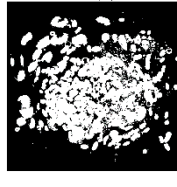
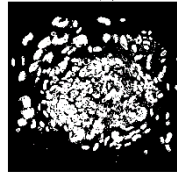
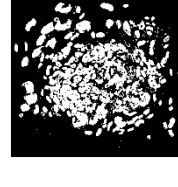
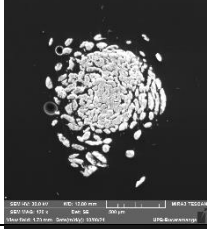
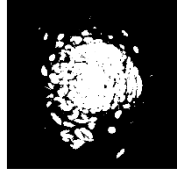
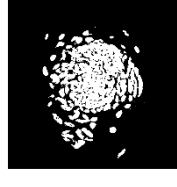
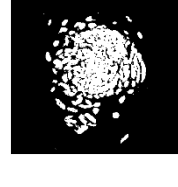
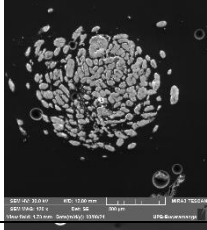
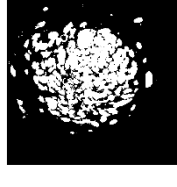
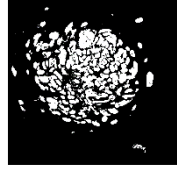
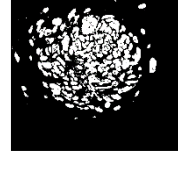
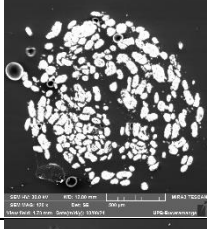
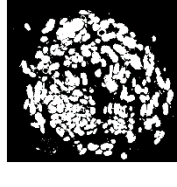
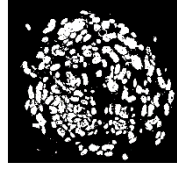
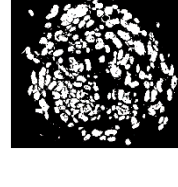
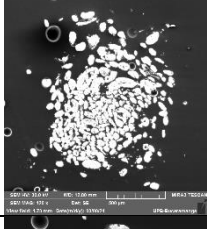
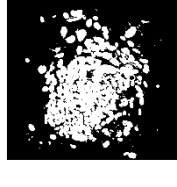
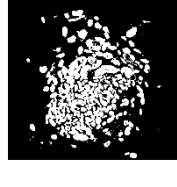
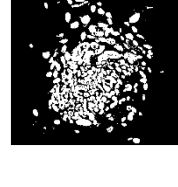
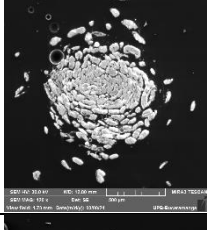
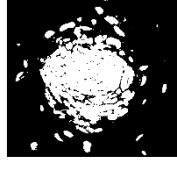
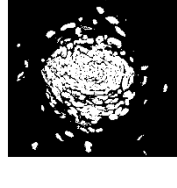
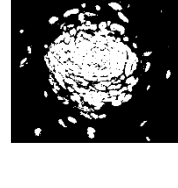
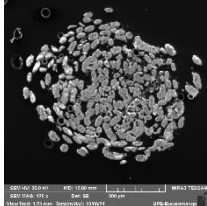
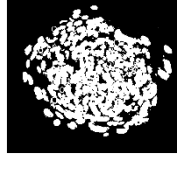
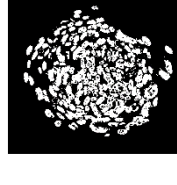
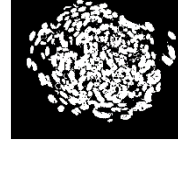
<p>Probeta 1 Nudo 4</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 5</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 6</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 7</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 8</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 9</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 10</p>				

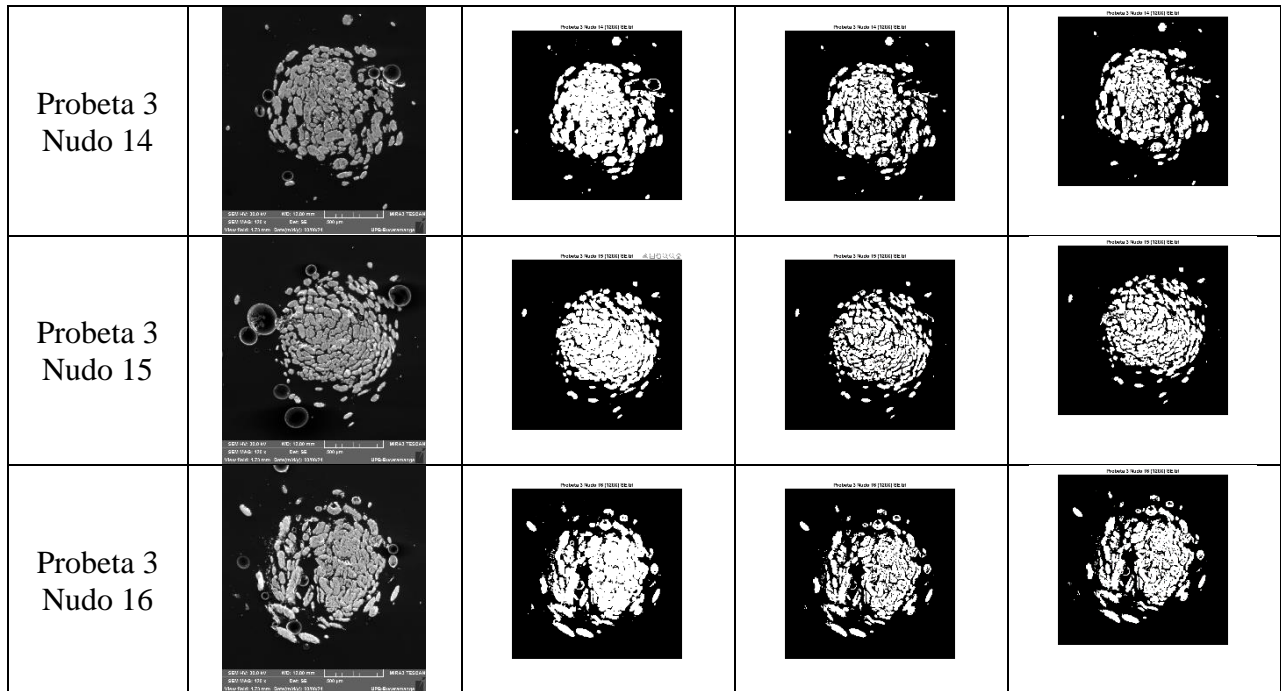
<p>Probeta 1 Nudo 11</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 12</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 13</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 14</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 15</p>				
<p>Probeta 1 Nudo 16</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 1</p>				

<p>Probeta 2 Nudo 2</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 3</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 4</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 5</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 6</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 7</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 8</p>				

<p>Probeta 2 Nudo 9</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 10</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 11</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 12</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 13</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 14</p>				
<p>Probeta 2 Nudo 15</p>				

<p>Probeta 2 Nudo 16</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 1</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 2</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 3</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 4</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 5</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 6</p>				

<p>Probeta 3 Nudo 7</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 8</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 9</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 10</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 11</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 12</p>				
<p>Probeta 3 Nudo 13</p>				



Apéndice F. Valores de área para cada sección de hilo en mm.

Micrografía	Área umbral Media	Área umbral Media + SD	Área umbral Punto de intersección
Probeta 1 Nudo 1	0.670	0.386	0.607
Probeta 1 Nudo 2	1.115	0.735	1.037
Probeta 1 Nudo 3	0.688	0.547	0.603
Probeta 1 Nudo 4	0.592	0.450	0.511
Probeta 1 Nudo 5	0.634	0.499	0.573
Probeta 1 Nudo 6	1.006	0.396	0.970
Probeta 1 Nudo 7	1.061	0.322	1.035
Probeta 1 Nudo 8	0.833	0.534	0.718
Probeta 1 Nudo 9	0.672	0.523	0.566
Probeta 1 Nudo 10	0.784	0.607	0.660
Probeta 1 Nudo 11	0.891	0.693	0.807
Probeta 1 Nudo 12	0.907	0.384	0.798
Probeta 1 Nudo 13	0.947	0.311	0.937
Probeta 1 Nudo 14	0.866	0.491	0.758
Probeta 1 Nudo 15	0.691	0.490	0.557
Probeta 1 Nudo 16	0.947	0.581	0.847
Probeta 2 Nudo 1	0.837	0.707	0.754

Probeta 2 Nudo 2	1.031	0.843	0.903
Probeta 2 Nudo 3	0.561	0.498	0.520
Probeta 2 Nudo 4	0.682	0.577	0.628
Probeta 2 Nudo 5	0.869	0.675	0.786
Probeta 2 Nudo 6	0.684	0.567	0.653
Probeta 2 Nudo 7	0.748	0.586	0.674
Probeta 2 Nudo 8	0.840	0.622	0.745
Probeta 2 Nudo 9	0.429	0.378	0.391
Probeta 2 Nudo 10	0.526	0.437	0.437
Probeta 2 Nudo 11	0.538	0.448	0.465
Probeta 2 Nudo 12	0.937	0.698	0.783
Probeta 2 Nudo 13	0.612	0.486	0.506
Probeta 2 Nudo 14	0.604	0.486	0.527
Probeta 2 Nudo 15	0.826	0.668	0.768
Probeta 2 Nudo 16	0.698	0.571	0.622
Probeta 3 Nudo 1	1.032	0.736	0.852
Probeta 3 Nudo 2	0.838	0.670	0.718
Probeta 3 Nudo 3	0.936	0.728	0.773
Probeta 3 Nudo 4	0.401	0.366	0.350
Probeta 3 Nudo 5	1.033	0.701	0.872
Probeta 3 Nudo 6	0.849	0.662	0.654
Probeta 3 Nudo 7	0.984	0.743	0.755
Probeta 3 Nudo 8	0.603	0.498	0.510
Probeta 3 Nudo 9	0.655	0.490	0.477
Probeta 3 Nudo 10	0.861	0.683	0.683
Probeta 3 Nudo 11	0.727	0.575	0.529
Probeta 3 Nudo 12	0.695	0.559	0.617
Probeta 3 Nudo 13	0.867	0.643	0.730
Probeta 3 Nudo 14	0.709	0.551	0.577
Probeta 3 Nudo 15	0.683	0.529	0.569
Probeta 3 Nudo 16	0.694	0.540	0.563

Apéndice G. Valores propiedades mecánicas para cada probeta.

Probeta ensayos mecánicos	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (%)	E (20-80 %) (MPa)	U_t (MPa)
Probeta 100_1	150,76	3,78%	4627,6	4,46
Probeta 100_2	177,45	4,43%	4980,8	3,50
Probeta 100_3	150,27	3,88%	4414,4	2,83
Probeta 100_4	163,76	5,06%	3682,5	3,56
Probeta 100_5	244,23	4,79%	5985,9	5,01
Probeta 100_6	104,04	3,52%	3403,7	2,60
Probeta 100_7	157,93	4,48%	4093,3	5,48
Probeta 100_8	71,46	3,64%	2220,7	1,82
Probeta 100_9	134,11	3,68%	4574,2	2,46
Probeta 100_10	138,43	5,54%	3224,9	3,03
Probeta 100_11	163,59	4,29%	4435,6	4,13
Probeta 100_12	223,10	5,27%	5430,7	4,61
Probeta 100_13	140,52	4,41%	3815,2	2,78
Probeta 100_14	144,03	3,30%	4836,5	2,37
Probeta 100_15	231,91	3,91%	6862,9	4,21
Probeta 100_16	180,13	5,28%	3507,4	4,57
Probeta 100_17	135,92	3,87%	4194,4	4,16
Probeta 100_18	96,35	4,45%	2411,3	3,96
Probeta 100_19	131,24	4,25%	3663	3,25
Probeta 100_20	158,28	4,22%	4565,4	3,21
Probeta 175_1	109,10	4,05%	3091,5	2,03
Probeta 175_2	101,44	3,23%	3449,3	2,12
Probeta 175_3	169,00	4,01%	5085,8	2,87
Probeta 175_4	116,82	3,97%	3540	2,30
Probeta 175_5	84,84	3,00%	2952,9	1,11
Probeta 175_6	63,04	4,91%	1366	1,59
Probeta 175_7	73,54	3,95%	1898,4	1,51
Probeta 175_8	192,03	4,61%	5275,5	3,29
Probeta 175_9	195,02	4,92%	5305,1	3,44
Probeta 175_10	127,68	5,22%	2893,5	2,92
Probeta 175_11	115,90	3,53%	3850,2	2,13
Probeta 175_12	116,84	4,31%	3283,5	2,24
Probeta 175_13	165,00	4,74%	4273,7	3,02
Probeta 175_14	162,00	3,84%	5012,3	3,28
Probeta 175_15	106,95	4,45%	2925,6	2,28
Probeta 175_16	91,40	3,27%	3239	2,13
Probeta 175_17	94,20	3,90%	2784,5	1,55

Probeta 175_18	102,45	3,44%	3465,6	2,99
Probeta 175_19	148,56	3,26%	5312,5	2,29
Probeta 175_20	107,80	4,33%	2919,5	2,34
Probeta 200_1	145,16	4,10%	4208,5	2,34
Probeta 200_2	129,01	4,46%	3704,7	2,21
Probeta 200_3	84,29	4,17%	2444,1	1,93
Probeta 200_4	149,98	4,33%	4160,1	2,75
Probeta 200_5	61,44	3,70%	2080,9	0,95
Probeta 200_6	144,41	3,33%	4866,1	2,16
Probeta 200_7	144,70	4,37%	3901,8	2,71
Probeta 200_8	137,51	4,89%	3936,2	2,67
Probeta 200_9	94,45	5,37%	2077,3	1,87
Probeta 200_10	67,86	3,21%	2307,3	0,98
Probeta 200_11	64,09	2,71%	2355,9	1,07
Probeta 200_12	61,25	3,60%	1734,1	1,13
Probeta 200_13	100,58	4,08%	2900,7	1,76
Probeta 200_14	85,10	3,36%	2865,2	1,47
Probeta 200_15	117,02	3,84%	3629,5	2,24
Probeta 200_16	169,99	3,09%	6724,2	2,21
Probeta 200_17	172,60	4,23%	5010,7	2,95
Probeta 200_18	117,43	5,43%	2564,5	2,97
Probeta 200_19	130,97	3,95%	3983,8	2,05
Probeta 200_20	107,24	2,93%	4237,7	2,28