EJE DE FORMACIÓN EN INVESTIGACIÓN

MONOGRAFÍA

Estudio de la morfología de la drupa del coco en relación a su comportamiento mecánico

Autor(es)

Sara Arévalo Londoño

Maria Isabel Serna Sierra

Paula Andrea Pineda Ortiz

Asesor(es)

Alejandro Alberto Zuleta Gil

Diana Urdinola

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN – ANTIOQUIA

2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

Presentación 1

Resumen 1

1. Planteamiento 3

1.1 Tema general del proyecto 3

1.2 Características generales del proyecto de investigación 3

1.3 Problema investigado-Pregunta e hipótesis de investigación 3

1.4 Elementos del problema de investigación 4

1.5 Limitaciones de la investigación: Alcance y riesgos 5

1.5.1 Alcance y resultados esperados. 5

2. Justificación 6

3. Objetivos 7

3.1 Objetivo general 7

3.2 Objetivos específicos: 7

4. Marco de referencia 8

4.2 Antecedentes 8

4.3 Estado del arte 10

5. Metodología 15

5.1 Trabajo de campo 15

5.1.1 Actividades para la obtención de la información **15**

5.1.2 Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información. **15**

5.2 Muestras 17

5.2.1 Objetos de estudio utilizados **17**

5.3.2 Instrumentos y técnicas de análisis de información **18**

5.3.3 Justificación de la elección de los métodos (instrumentos) para la recolección de información **18**

6. Resultados y discusión **19**

6.1 Caracterización morfológica 19

6.2 Caracterización del comportamiento mecánico 25

6.2.1. Comportamiento mecánico en las pruebas de compresión **25**

6.2.2. Comportamiento mecánico en las pruebas de impacto **27**

7. Conclusiones **28**

8. Referencias **30**

9. Anexos **31**

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Partes de la drupa del coco, diferenciación de las capas en el corte transversal (a) (Barres, L. 2016) y zonas del coco (endocarpo) (b). 9

Figura 2. Capas endosperma, endocarpio y testa, con micrografía con aumento ocular del 20x 10

Figura 3. Corte longitudinal del endocarpo con disposición de fibras lineal a sus polos. En esta imagen se evidencia el crecimiento de las fibras y su comportamiento según la zona en donde se ubique. 19

Figura 4. Fibra entre capas, Endosperma (a), Endocarpo con fibra (b), Testa Zoom 20x (c) 19

Figura 5. Corte longitudinal del endocarpo desde la parte interna en donde se observan partes de la testa y del endosperma aún adheridos al endocarpo (A); adicional se observa el poro de germinación abierto con desprendimiento de corteza (B) y el crecimiento de las fibras alrededor del mismo (C). .. 20

Figura 6. *Corte longitudinal con extracción parcial de endosperma (a), vista frontal de corte longitudinal con endosperma completa (b), análisis de la forma ovoide y su repartición de fuerzas (c).* 22

Figura 7. Fotografías del espécimen sin fracturar. Vista superior (a), vista lateral (b), vista perspectiva (c) 22

Figura 8. Crecimiento en estructura ramificada, análisis del comportamiento de las fibras en el endocarpo 23

Figura 9. *Micrografía de la sección del endosperma con aumento ocular de 20x.* 24

Figura 10. Micrografía del endocarpo con aumento ocular de 20x (a). Patrón abstraído del endosperma observado desde el estereomicroscopio (b). 24

Figura 11. Muestras de coco sometidas a pruebas de compresión en posición vertical (a) y horizontal (b). Foto tomada de la máquina de ensayo universal WPM. 26

***Figura 12*.** Posicionamiento de probetas para prueba de impacto con distribución de fibras vertical y horizontal 28

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los resultados de las pruebas de compresión en muestras en sección longitudinal y transversal con pulpa 27

Tabla 2. Comparación de resultados de cocos enteros ubicados vertical y horizontalmente en la prueba de compresión 27

Tabla 3. Gráfica comparativa de resultados de muestras con fibras verticales y horizontales. 28

INTRODUCCIÓN

Presentación

Los seres vivos y algunos objetos naturales al pasar los años van mostrando cambios en su forma y estructura, presentando daños y malformaciones que terminan afectando su correcto funcionamiento, así mismo sucede con los materiales creados por el hombre, sea por condiciones como intemperie, antigüedad o uso, siendo este último el más influyente y razón por la cual guardan relación con exposición a impactos y esfuerzos. Los objetos entonces van enfrentándose a cambios que se ven posteriormente reflejados en su función. Como solución a esto se han aplicado algunos aditamentos al material o al producto aumentando así el volumen, forma y peso del mismo, provocando en últimas la reducción de su aplicabilidad y usabilidad. Sin embargo, la naturaleza ha empleado estrategias que brindan protección y resistencia a objetos naturales, como es el caso de las drupas, frutos conformados por diversas capas y una semilla en su interior. Dentro de este grupo se encuentra el coco, el cual por medio de su composición estructural es caracterizado por su alta resistencia al impacto, aportándole al fruto una mayor protección y capacidad de absorción de energía.

Con la presente investigación se pretende estudiar la morfología de la drupa del coco para la identificación de características estructurales que proporcionen un mejor comportamiento mecánico frente al impacto y con ello dar bases en el desarrollo y planteamiento de soluciones a nuevos productos resistentes al impacto.

Resumen

Esta investigación se centra en el análisis de la drupa de coco, teniendo en cuenta su configuración morfológica y relacionando esta con su comportamiento frente al impacto y la compresión. Con eso se pretende brindar información útil para el desarrollo y planteamiento

de nuevas soluciones de diseño frente a problemáticas de deterioro por exposición a impacto y fuerzas externas. Para llevar a cabo esta investigación se realizó la caracterización morfológica macro y micro estructural de la drupa del coco, además exponer a pruebas de impacto y compresión diversas partes de la drupa. Esto permitió establecer al endocarpo y a la fibra de coco como elementos fundamentales para la abstracción de morfologías en relación con su comportamiento mecánico. Del mismo modo la cantidad de fibra y la disposición interna de la misma, son factores determinantes en su comportamiento frente al impacto.

***Palabras clave**: drupa de coco, morfología, resistencia mecánica, diseño industrial*

1. PLANTEAMIENTO

1.1 Tema general del proyecto

Con el fin de encontrar en la naturaleza soluciones que brindan mayor resistencia mecánica a los materiales que se encuentran expuestos a diferentes tipos de esfuerzos, como impacto y compresión, se plantea la caracterización morfológica y mecánica de la drupa del coco para identificar las relaciones existentes entre ambas, que posteriormente permitan el uso de esta información para el desarrollo de materiales y productos con un mejor desempeño mecánico.

1.2 Características generales del proyecto de investigación

En este proyecto se realizará una investigación descriptiva y cuantitativa en donde se llevará a cabo el análisis y caracterización morfológica micro y macroestructural de la drupa del coco con relación al comportamiento mecánico. Lo anterior con el fin de mejorar la resistencia al impacto de materiales o productos que así lo requieran.

1.3 Problema investigado-Pregunta e hipótesis de investigación

Algunos materiales u objetos presentan cambios en su forma o en su comportamiento mecánico debido al deterioro causado por los diferentes esfuerzos e impactos que puedan ser ejercidos sobre estos. Con relación a esto, se han realizado algunas modificaciones al material o producto tales como recubrimientos, carcasas, combinaciones de materiales, entre otros con la intención de aumentar su tenacidad. Sin embargo, estas soluciones le adicionan peso y volumen al objeto, lo cual puede llegar a limitar su aplicación y usabilidad.

Frente a esta misma problemática la naturaleza ha aplicado estrategias que brindan protección y resistencia al objeto en cuestión. Un ejemplo de ello es la drupa del coco, la cual, a través de la disposición de sus múltiples capas y de la morfología macro y micro estructural le brindan al fruto las capacidades de absorción de energía y tenacidad requeridas para soportar golpes e impactos sin perjudicar la semilla. Sin embargo, hace falta un estudio detallado y sistemático sobre la caracterización morfológica de la drupa del coco en relación con sus propiedades mecánicas, especialmente las relacionadas con la resistencia al impacto.

Con esta investigación se pretende estudiar la morfología de la drupa del coco, con la intención de extraer las características estructurales que proporcionen un mejor comportamiento mecánico frente al impacto. Lo anterior brinda información útil para el desarrollo y planteamiento de nuevas soluciones de diseño como respuesta a las problemáticas presentadas por la exposición al impacto.

Pregunta de investigación:

¿Cuáles son las características morfológicas que le dan las propiedades de resistencia al impacto a la drupa del coco?

1.4 Elementos del problema de investigación

- Estructura de la drupa del coco
- Composición morfológica del coco
- Comportamiento mecánico de la drupa del coco
- Relación entre la morfología y el comportamiento mecánico del coco
- Absorción de energía
- Configuración morfológica

- Resistencia al impacto.

1.5 Limitaciones de la investigación: Alcance y riesgos

Se analizará la morfología de la drupa de coco, a partir de ello, se identificarán cuáles propiedades, configuraciones, o patrones permiten que esta sea resistente. Para ello se utilizarán fichas de análisis morfológico, con base a la configuración jerárquica del material biológico, así como ensayos de compresión y pruebas de impacto, que permitan comprobar dicha resistencia.

1.5.1 Alcance y resultados esperados.

Se analizará el comportamiento mecánico en relación a la morfología de la drupa de coco, a fin de encontrar las propiedades, configuraciones o patrones que le proporcionan mayor resistencia. Para ello, se utilizarán fichas de análisis morfológico, con base a la configuración jerárquica del material biológico, así como la realización de ensayos de compresión y pruebas de impacto que permitan comprobar dicha resistencia.

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de esta investigación permitirá conocer las posibles configuraciones morfológicas que proporcionan resistencia al impacto partiendo de la estructura y disposición interna de la drupa de coco. Lo anterior, con el fin de identificar características que mejoren el desempeño funcional relacionado con el uso principal de los productos, lo que puede mejorar las condiciones de deterioro y durabilidad, problemáticas frecuentes evidenciadas en objetos y materiales durante el proceso de diseño, producción, comercialización y en el uso mismo de los objetos.

Teniendo en cuenta que el coco es un fruto que se expone a situaciones de impacto se ve la oportunidad de indagar la relación de la morfología con la resistencia mecánica, destacando que actualmente es un tema levemente explorado y con una alta aplicabilidad en áreas de diseño, ortopedia y embalaje, entre otras áreas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Identificar las características morfológicas presentes en la drupa del coco que le brindan mayor resistencia mecánica, en términos de su resistencia al impacto y a su compresión.

3.2 Objetivos específicos:

- Identificar la morfología presente de la drupa de coco para establecer patrones formales y estructurales
- Caracterizar el comportamiento mecánico de la drupa del coco.
- Establecer la relación encontrada entre la caracterización morfológica y el comportamiento mecánico.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.2 Antecedentes

Partiendo de las semillas con hueso monospermo o drupas, conocidas por su variedad de capas protectoras las cuales se dividen desde el exterior por el epicarpio o exocarpo de la fruta (corteza externa), siguiendo con el mesocarpo (cuerpo fibroso), endocarpo (cuerpo externo de la semilla y corteza dura) y, finalmente, se encuentra el endospermo y el embrión (la semilla real).

Esta composición estructural y morfológica, teniendo en cuenta que cada capa tiene una consistencia, morfología y estructura física (material) diferente, brinda a la fruta y a su semilla una capacidad de absorción y distribución de energía, así mismo como lo expone el Instituto Experimental Jardín Botánico (Lasser, 1976) en su acta Botánica, donde estudiaron 8 diversas semillas tipo drupa y 3 tipo baya. Cabe resaltar que las drupas se relacionan con la baya por dicha estructura protectora y las diferentes capas que dividen, aíslan y protegen el contenido. Algunos de los frutos que se consideran drupas son la aceituna, mango, níspero, albaricoque, cereza, melocotón, nuez, ciruela, coco, chontaduro, etc.

Retomando el estudio mencionado, se partirá de la elección de la drupa de coco, la cual,

> "Está constituida de afuera hacia adentro por una envoltura fibrosa llamada mesocarpio, seguido por el endocarpio y finalmente el endospermo. El endocarpio es un material muy duro, de unos cinco milímetros de espesor, el cual cubre la pulpa comestible o endospermo. Este último, de color blanco, corresponde a la parte comestible cuyo interior alberga un líquido opalino y

azucarado conocido como el agua de coco. Este líquido llena las tres cuartas partes de la cavidad central del fruto". (Taborda, 2014).

Tal cual como se expone en la *Figura 1* desde un corte transversal (a), las capas de la drupa tienen diferentes espesores, consistencias, colores y geometrías. Adicional a ello, tiene regiones, a los cuales se les asigno una denominación dentro de la investigación (b).

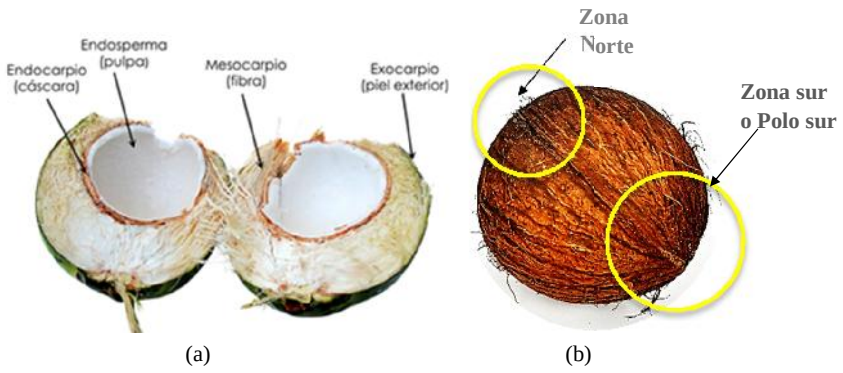


Figura 1. Partes de la drupa del coco, diferenciación de las capas en el corte transversal (a) (Barres, L. 2016) y zonas del coco (endocarpo) (b).

El espesor de la corteza del coco o mesocarpio (popularmente llamado capacho), varía entre 3 y 5 centímetros, y representa el 35 % del total de la fruta. El 90 % del mesocarpio está conformado por fibras, constituidas principalmente por lignina y celulosa. Las fibras tienen una longitud comprendida entre 15 y 30 centímetros (Taborda, 2014).

Tal y como se observa en la *Figura 2* se pueden apreciar los diversos espesores y composiciones presentes en las capas de la drupa, incluyendo la testa, aquella capa milimétrica que se adhiere a la pulpa y en últimas se consume en el momento de la ingesta del fruto.

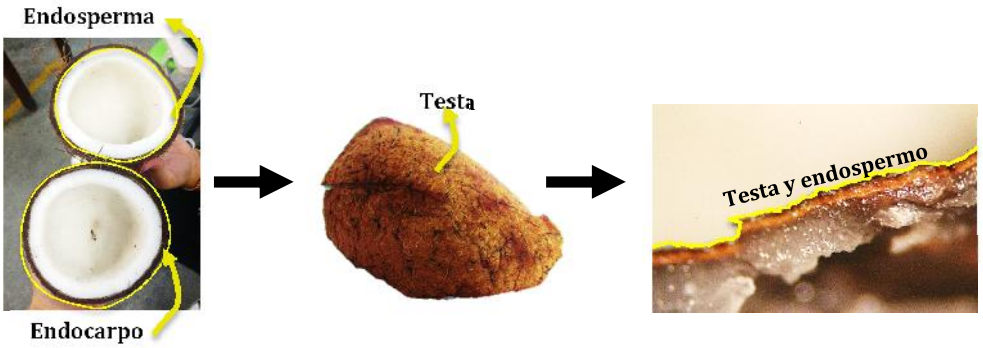


Figura 2. Capas endosperma, endocarpio y testa, con micrografía con aumento ocular del 20x

Soportado en la guía realizada (Franco, S) en donde infiere acerca de las propiedades mecánicas de los materiales, las cuales son generalmente anisotrópicas y varían según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material, ordenadas uniáxicamente

4.3 Estado del arte

Actualmente, debido a su calidad de resistencia, durabilidad y otras ventajas, el coco es un material que se usa para fabricar una gran variedad de materiales para decoración, pisos, hilos, sogas, entre otras. “La fibra de coco, una fibra natural que ha sido usada por años de forma artesanal en países como la India, puede llegar a ser una alternativa para sustituir materiales de refuerzo en la elaboración de materiales compuestos.” (Taborda, 2014).

Diversos estudios en torno a la fibra de coco, dan paso a un amplio estudio en el cual se estudiarán sus características y su composición, teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de fibras vegetales dependen del tipo de celulosa y la geometría de la celda elemental (Taborda, 2014). Esto si se considera como material de aporte la fibra del coco, recalcando sus virtudes y amplias utilidades frente a la absorción de energía mecánica. La fibra de coco posee con unas capacidades de absorción de impacto considerables, entre otras.

Cabe resaltar que es por medio de la celulosa, considerada el componente principal de la estructura de dicha fibra, lo que permite proporcionar resistencia, rigidez y estabilidad estructural; igualmente el uso de las fibras vegetales en la elaboración de los materiales compuestos permite reducir el peso del material y mantener una dureza y rigidez adecuada (Taborda, 2014). Un ejemplo de ello se encontró en 2006 por Norberto Emmanuel Nava Valladares, un egresado del Instituto Politécnico Nacional, el cual "desarrolló la patente de un chaleco antibalas fabricado con fibra de coco, este funcionó perfectamente" (Ureña & Rojas, 2015).

Así que, en cuanto a resistencia constructiva, es un material confiable, del cual condescenderá un estudio coherente respecto a sus propiedades mecánicas en donde, junto con el estudio de la resistencia al impacto (energía necesaria para fracturar un material bajo condiciones estándar (basado en definición por Ensigner.es); posibilitará el desarrollo de dichos materiales.

Algunas de las aplicaciones actuales del coco, propiamente de su fibra se presentan en materiales de construcción, colchones y empaques de algunos productos. Un experimento realizado por Trujillo y Arias permitió evaluar las propiedades en algunos compuestos con una matriz de polipropileno reforzados en un 40% con cáscara de cebada, endocarpio de coco y una madera blanda. Los resultados muestran que el compuesto con endocarpio de coco es térmicamente estable hasta 195 °C, presenta una mayor elongación y mejor resistencia al impacto que el compuesto con harina de madera. Sin embargo, la resistencia a la tracción resultó ser superior en la cáscara de cebada y menor en el endocarpio de coco. Se observó también, un aumento de la resistencia a la tracción para todas las muestras con el tratamiento químico (Trujillo & Arias, 2013). En otro estudio realizado por los mismos autores se empleó

un poliéster para ser reforzado con endocarpio de coco pulverizado. Los resultados indicaron un cambio poco significativo en la resistencia a tracción, una disminución del porcentaje de elongación, aumento en el módulo de elasticidad y un aumento de la absorción del agua, al adicionar el refuerzo.

En el área de materiales compuestos verdes, ya se han iniciado investigaciones en varias ciudades de Colombia, como en Manizales, donde elaboraron un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano, utilizando FSP (Fibras extraídas del seudotallo de plátano) tratada y sin tratar, mediante la técnica de moldeo manual. (Sepúlveda, 2014)

La investigación en este campo tiene gran disponibilidad de equipos y personal experimentado para explorar con ayuda de una nueva fase de refuerzo. “Del coco sólo se ha empleado el mesocarpio para reforzar cemento, encontrándose un incremento en la resistencia a la compresión y a la flexión” (Trujillo & Arias, 2013)

Se sabe que la nuez de coco puede abrirse de diversas maneras, ya sea manual o mecánicamente “with one strong hard blow from a thick, heavy bladed knife. Another method is to strike the coconut with several blows to the center turning the coconut as you strike so it can crack almost evenly into two halves” (Ashaolu, M.O & Odingiwe, C. 2014). Así mismo como se menciona, el coco debe recibir varios impactos para poder abrirse y existen técnicas para la óptima apertura de ésta.

El estudio realizado por Ashaolu1, M.O y Odingiwe, C. en 2014, el cual hacía parte del Departamento de Ingeniería Agrícola y Bio-Ambiental de Nigeria donde indagaron y exploraron acerca del impacto y la energía adecuada requerida para romper la vaina de coco. Éste consta del análisis de tres tamaños diferentes, pequeño (d <9 cm), medio (9 <d <10 cm) y grande (10 <d <11 cm). El objetivo de su investigación era quitar la cáscara de la nuez de

coco completamente de una manera limpia, dejando la carne con contusiones mínimas. “El desarrollo del dispositivo de craqueo de tuerca requiere algunos parámetros de diseño de ingeniería tales como velocidad de impacto, requerimiento de energía; asimismo la importancia a tener en cuenta de una estimación precisa de la forma, tamaño, área de superficie, volumen y gravedad específica del biomaterial” (M.O Ashaolu and C. Odingiwe, 2014)

El agrietamiento en los experimentos se vio afectado por la variación en el tamaño del coco, el espesor de la concha, la curvatura de la variación en el tamaño del espesor de coco de la concha, la curvatura de la superficie y el método de retención de la tuerca durante el agrietamiento

Un problema común en el diseño y fabricación de materiales compuestos con componentes de origen vegetal u orgánico es la incompatibilidad entre los constituyentes del compuesto. Esto ha sido la base para iniciar investigaciones con el fin de encontrar tratamientos que mejoren las propiedades entre las fases involucradas y como consecuencia de ello generen materiales con desempeños satisfactorios en el incremento de sus propiedades y en su compatibilidad; además de permitir la reducción del impacto negativo en cuanto a la contaminación que proveen, usualmente aportada por la producción y desechos finales.

La obtención de nuevos materiales compuestos biodegradables en aplicaciones de ingeniería, representa retos tecnológicos. Aunque el desarrollo del tema en el país es nuevo, los avances con fibras naturales y biopolímeros han mostrado resultados satisfactorios “por lo que algunos de los principales desafíos que se presentan con estos materiales compuestos varían desde la capacidad para determinar la cantidad óptima de refuerzo, hasta evitar la

incompatibilidad entre los componentes del material compuesto y así tener las técnicas y procesos adecuados para su fabricación".

Del mismo modo, las diversas necesidades pueden ser suplidas con el diseño y fabricación de materiales compuestos, desde la reducción de costos hasta el mejoramiento de las propiedades; sin embargo, el caso de estudio del endocarpio de coco no ha sido un tema que esté ampliamente abordado.

Como se evidencia en los estudios mencionados, el campo de acción o de utilidad del coco actualmente, además de su uso para la alimentación, está enmarcado en la utilización de la fibra como insumo para la absorción de energía frente al impacto y aunque se ha estudiado el comportamiento del endocarpio frente a tracción e impacto, no se han realizado análisis morfológicos que den cuenta de dicho comportamiento.

5. METODOLOGÍA

5.1 Trabajo de campo

5.1.1 Actividades para la obtención de la información

Dentro de cada objetivo específico se definieron actividades con el fin de obtener los resultados que permitieron caracterizar la morfología de la drupa de coco. El proceso experimental se dividió en tres fases. En la primera fase se realizó la observación macro estructural del coco, haciendo un análisis morfológico de cada una de las capas, posterior a ello se procede a la identificación de formas y características presentes en el endocarpo, para la realización de probetas posteriormente llevadas al estereomicroscopio.

En la segunda fase se procedió a estudiar el comportamiento mecánico de la drupa del coco, a través de pruebas de compresión e impacto usando las probetas correspondientes de la fase anterior. En consecuencia, en la tercera fase se relaciona el comportamiento mecánico y la composición morfológica a partir de la estandarización de probetas y su posterior análisis de resultados.

5.1.2 Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información.

En la primera fase se realizó una observación macroestructural, que aportó a la información obtenida de la indagación inicial. Posterior a ello se realizó la división de las capas de la drupa y se procedió con la toma de muestras. Estas fueron comparadas por forma, color, peso, densidad, dimensión y curvatura.

Después de analizar la información obtenida, se consignó en tablas que permitieron evidenciar las diferencias y realizar comparaciones detalladas a partir de la relación entre la morfología y el comportamiento mecánico.

Para poder realizar las pruebas de resistencia y comparar los registros de manera precisa, se requirió la estandarización de probetas que fueron seleccionadas según las zonas con mayor potencial para la absorción de energía y por los análisis realizados en las pruebas. Los resultados obtenidos tanto en las pruebas de impacto como en las pruebas de compresión, se tabularon y se compararon con apoyo de gráficas porcentuales, relacionando su dimensión, peso, y origen (ubicación en el coco).

A lo largo del proceso se realizaron análisis microscópicos realizados con un estereomicroscopio Olympus y registrados empleando una cámara Canon EOS rebel t5i; esto, con la intención de identificar los cambios morfológicos en relación con las pruebas mecánicas. Toda la información obtenida, fue consignada en tablas de registro, en este caso la tabla morfológica microestructural, la cual sirvió como sustento para la realización de abstracciones de patrones morfológicos.

En el transcurso de la investigación, se realizaron diversos registros fotográficos y de video, que sirvieron de apoyo para el análisis, comparación y estudio general de los hallazgos presentados en cada etapa.

5.2 Muestras

5.2.1 Objetos de estudio utilizados

Inicialmente se obtuvieron muestras de diversas partes de la drupa, comparando la capa, dirección de fibras, humedad, calibre y densidad. Con respecto a los resultados obtenidos, se seleccionaron aquellas que presentaran valores de mayor resistencia al impacto y posteriormente fueron estandarizadas.

Las probetas estandarizadas se obtuvieron del mesocarpo, endocarpo, endosperma y la testa, las cuales, tenían una dimensión de 1 x 3 cm, sin importar de qué capa fueran, dichas probetas fueron utilizadas en la pruebas de impacto en el péndulo tipo Charpy marca WPM. El total de probetas para esta prueba fue de 36, repartidas en dos análisis preliminares cada uno con 9 probetas y un último análisis de 18 probetas separadas por zonas de la A-F.

En el caso de la prueba de compresión se realizaron en total 46 ensayos en donde se hizo un ensayo preliminar con posición vertical (2) y horizontal (2), posterior a ello se analizaron 3 cocos por cada posición. Por otro lado, se compararon 18 secciones transversales y 18 longitudinales de las cuales solo la mitad de las probetas estaban sin pulpa. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente.

5.3 Registro

5.3.1 Instrumentos de registro de información

Para el registro de la información proporcionada por la investigación, en pruebas de resistencia o en el análisis morfológico se precisaron registros fotográficos

y tablas para la recopilación de los elementos hallados. Del mismo modo la documentación fue apoyada en el uso de una bitácora de consignación y análisis del proceso de caracterización.

5.3.2 Instrumentos y técnicas de análisis de información

Se utilizaron gráficas y tablas que permitieron la consignación y análisis de resultados obtenidos en las diferentes actividades. Así mismo, se apoyó en la información consignada en la bitácora que facilitó el análisis y comparación de los resultados arrojados en el proceso de caracterización.

Las gráficas utilizadas se aplicaron para registros individuales de las muestras y la comparación según el tipo de ensayo, la dirección de sus fibras, el peso y la composición de la probeta (estándar, coco completo y medio coco).

5.3.3 Justificación de la elección de los métodos (instrumentos) para la recolección de información

Para la caracterización morfológica se decidió hacer el análisis de la drupa de coco por medio del estereomicroscopio por el nivel de detalle alcanzado en las muestras. Adicional a ello, se utilizó una cámara Canon EOS Rebel T5i para el registro de las imágenes obtenidas en el mismo.

Por otro lado, para los análisis de comportamiento mecánico, se realizaron pruebas para conocer el alcance de la resistencia al impacto del endocarpo a través del Péndulo Charpy (WPM) con martillos de 30 y 15 kg. Además de pruebas de resistencia a la compresión para obtener los esfuerzos máximos en las muestras. Esta prueba fue realizada por medio de la máquina de ensayo universal (WPM) con celda de carga de 4 toneladas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización morfológica

Luego de la caracterización morfológica a nivel macroestructural se observó que las fibras de la drupa, desde el mesocarpo hasta la testa, están dispuestas en sentido vertical iniciando en los poros de germinación del fruto, con un desplazamiento hacia el polo sur; zona en donde la fibra empieza a desprenderse de la corteza, tal y como se puede observar en la *Figura 3.*

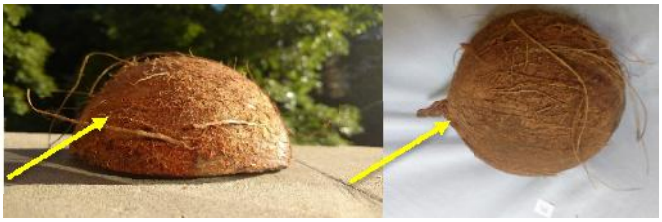


Figura 3. Corte longitudinal del endocarpo con disposición de fibras lineal a sus polos. En esta imagen se evidencia el crecimiento de las fibras y su comportamiento según la zona en donde se ubique.

Adicional a esto, se evidenció que las fibras entrelazan las capas abarcadas desde el mesocarpo hasta la testa, como se puede observar en la *Figura 4*, en donde se refuerza lo observado macroestruralmente con la micrografía del corte transversal de las capas endocarpo, endosperma y testa.



Figura 4. Fibra entre capas, Endosperma (a), Endocarpo con fibra (b), Testa Zoom 20x (c)

A pesar de que la mayoría de fibras se encuentren levantadas y dejen aparentemente los poros de germinación descubiertos (esto únicamente en la parte externa), estas, se encuentran de diversos calibres y/o longitudes, acumuladas y entrelazadas en estas zonas. Tal y como se observa en la *Figura 3, e*l crecimiento de las fibras externas se da desde el polo sur. Mientras que las fibras internas se aglomeran tanto en el polo sur como en el poro de germinación abierto, lo que alude a una interconexión entre estas dos zonas o la tendencia de crecimiento con origen en dichas zonas, apreciable en la *Figura* 5, además de demostrar que poseen un refuerzo internamente. Esto contrasta la idea de "desprotección" o de zona "descubierta" al observar los poros con poca fibra en el exterior.

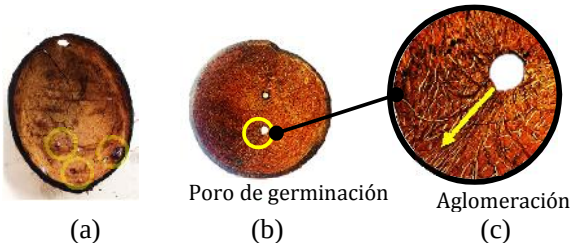


Figura 5. Corte longitudinal del endocarpo con partes de la testa y del endosperma aún adheridos al endocarpo (a). Poro de germinación abierto con desprendimiento de corteza (b). Crecimiento de las fibras alrededor poro de germinación abierto(c).

El diámetro, longitud y dirección del crecimiento de las fibras pueden variar, sin embargo, en el endocarpo se encuentran unas líneas que marcan la corteza, estas líneas se caracterizan por el engrosamiento de la corteza en dicha zona, además de la aglomeración de fibras en ellas. Éstas son, respectivamente, las líneas divisorias del coco que se comportan como las "venas" principales. De allí se expanden al resto del coco manteniendo su sentido vertical.

En consecuencia, la distribución de las fibras verticalmente (en su corteza o endocarpo), combinado con la distribución de las mismas a través de las capas

(intersectándolas y uniendo una con otra); crean una especie de malla que potencia la absorción y distribución de energía frente al impacto que soportada desde el análisis realizado en trabajos anteriores como en el estudio del comportamiento mecánico de los cuerpos mallados o superficies mallados realizado por (Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel, 2000). Del mismo modo, el crecimiento relacionado con las 3 direcciones de las líneas divisorias o "venas", se comportan como refuerzos para la corteza; factores que le brindan capacidades de resistencia mecánica con respecto al impacto y al esfuerzo a la compresión. Lo anterior, da un indicio acerca de la relación de la disposición de las fibras con respecto a su comportamiento mecánico, pues las propiedades mecánicas de fibras vegetales dependen del tipo de celulosa y la geometría de la celda elemental (Taborda, 2014), la cual a su vez está relacionada con la disposición de las fibras en el espécimen.

Por otra parte, las formas geométricas encontradas en la observación macroestructural de la drupa son ovoides (o elipsoides achatados), triangulares y las estructuras ramificadas. La primera, se ve reflejada en la forma del coco, partiendo del epicarpo hacia el cotiledón (pulpa líquida), como se puede observar en el corte longitudinal en la

Figura 6. Dichas capas, se inscriben en una figura ovoide, forma que se caracteriza por la forma de sus extremos verticales y cómo estos permiten que las fuerzas se distribuyan hacia sus laterales (basado en la posición vertical, en donde la forma es más alta que ancha), el comportamiento mecánico de esta forma ha sido estudiado y analizado en estudios de geometrías, como es el caso del huevo, el cual demuestra una alta resistencia a la compresión (Sánchez & Maldonado, 2013).



Figura 6. Corte longitudinal con extracción parcial de endosperma (a), vista frontal de corte longitudinal con endosperma completa (b), análisis de la forma ovoide y su repartición de fuerzas (c).

La segunda forma, se puede observar en la Figura 7 en la cual se ve reflejada una disposición triangular en los poros de germinación (a); igualmente en la zona inferior o polo sur del coco, en donde a partir de fibras, se forma una protuberancia con forma piramidal (b) directamente relacionada con las 3 líneas divisorias (c). La forma triangular es considerada "la forma geométrica más simple y resistente" (Amaya & Aurelio 2012), lo que la convierte en factor pertinente debido a sus características estructurales las cuales constan de "ser la única forma que no se deforma cuando sobre éste actúa una fuerza" (Vázquez, 2012).

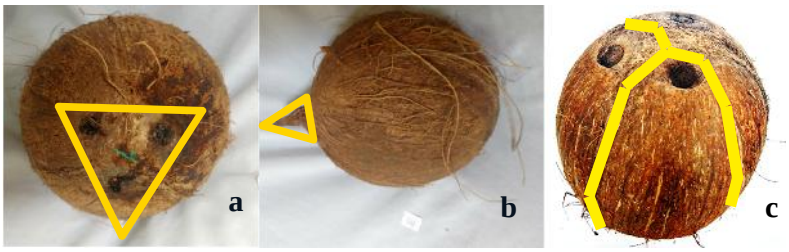


Figura 7. Fotografías del espécimen sin fracturar. Vista superior (a), vista lateral (b), vista perspectiva (c)

La tercera forma, denominada estructura ramificada se ve evidenciada en el crecimiento de las fibras, lo que permite vislumbrar la distribución de energía a lo largo del

coco; tal y como se observa en la *Figura* 8. Este análisis se basa en la ley constructiva que según Bejan, A (2007) consta de patrones que determinan la vía más eficiente para un flujo determinado, en otras palabras, las vías con el menor esfuerzo. Esta estructura permite entonces considerar que el punto de esfuerzo en donde el fruto recibe la fuerza canaliza la energía recibida y la distrtiuye, reduciendo las posibilidades de deformación y ruptura.

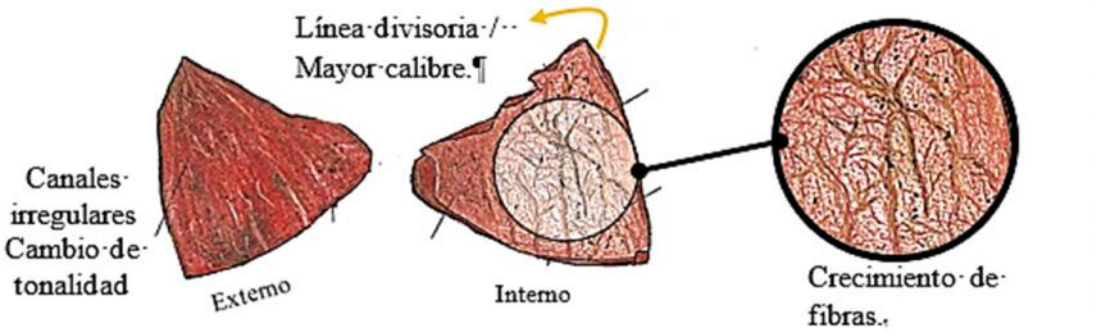


Figura 8. Crecimiento en estructura ramificada, análisis del comportamiento de las fibras en el endocarpo

Por consiguiente, se relacionan las propiedades de resistencia mecánica de impacto y compresión con las figuras geométricas hallada, esto con base a que dichas formas, se caracterizan por tener una buena distribución de fuerzas, como lo es la forma ovoide que, según la zona en donde se aplique el esfuerzo puede resistir cargas con una leve deformación o presentar un comportamiento “plástico” sin presentar daños físicos significativos, hasta valores de 400 kg en situación de compresión. Así mismo, las formas triangulares le brindan equilibrio en cuanto a la repartición de fuerzas. Por último, las estructuras ramificadas que se comportan como canales de distribución de canales de energía frente a una fuerza aplicada lo que reduce ruptura en punto de esfuerzo.

En cuanto al análisis del endosperma, desde una observación microestructural se hallaron formas baciliformes las cuales se encuentran aglomeradas unas con otras y tienen

una distribución radial con respecto al centro del fruto lo cual se puede observar en la *Figura 9*, en donde se ve reflejado la dirección del crecimiento de la pulpa.



Figura 9. Micrografía de la sección del endosperma con aumento ocular de 20x.

A nivel microscópico se hallaron patrones conformados por elementos esféricos en cadena, que tenían coalición con otras semejantes por medio de filamentos redondeados y no definidos. Todo esto era contenido por dos capas externas que tenían una corteza irregular, como se muestra en la Figura 10 *(a).* Del mismo modo se abstrajeron patrones de micrografías (b). Estas fueron obtenidas de fibras ubicadas en el endocarpo las cuales conformaban una red de formas acanaladas entrelazadas distanciadas entre sí por una medida repetitiva, además de encontrarse intercaladas entre hileras. Esta disposición se repetía por capas superpuestas. Dicha red puede ser considerada como superficie mallada permitiendo la distribución de energía analizada por (Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel, 2000).

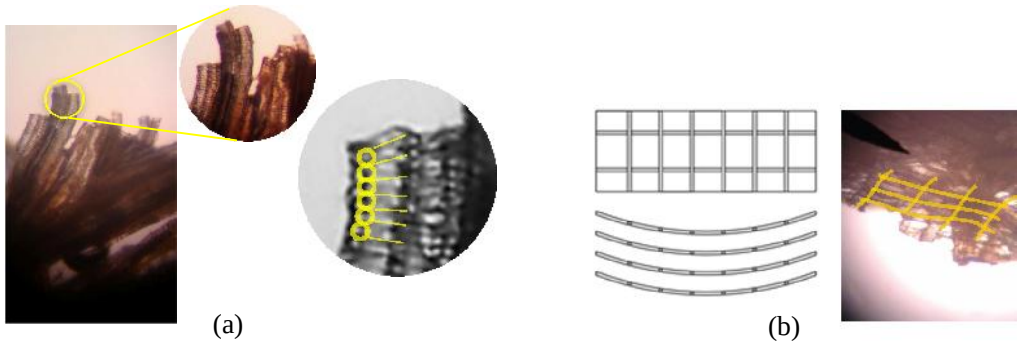


Figura 10. Micrografía del endocarpo con aumento ocular de 20x (a). Patrón abstraído del endosperma observado desde el estereomicroscopio (b).

En razón de lo anterior, se plantea entonces que la distribución de las fibras en relación con las hileras, permiten a la fibra o a la capa ofrecer mayor distribución de energía debido a los espacios entre ellas. En el caso de la cadena de elementos esféricos presentado en la Figura 10 (a) sus formas esféricas y la separación que hay entre los filamentos de unión permiten un comportamiento de malla, esto analizado desde la distribución y las propiedades mencionadas en el estudio de estructuras y superficies en malla por (Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel, 2000). Sin embargo, el patrón que contaba con más espacios no era necesariamente más flexible, su distribución intercalada le permitía tener una mayor estabilidad dimensional y mayor capacidad de soportar esfuerzos, como en el caso de la compresión, datos que fueron arrojados después de hacer pruebas a probetas para el análisis del comportamiento del endocarpo y la influencia de la fibra en los resultados.

6.2 Caracterización del comportamiento mecánico

6.2.1. Comportamiento mecánico en las pruebas de compresión

Durante la prueba de compresión los resultados destacados estuvieron relacionados con aquellos cocos que tuvieran mayor cantidad de fibras y de pulpa como se observa en la *Figura 11*. Sin embargo, los resultados dependen directamente de la dirección en la que se posiciona el coco, esto en relación con el sentido y cantidad de fibras. En este caso se evidencian la diferencia de fallas al posicionar el coco con las fibras verticales (a) y con las fibras horizontales (b), en donde (a) cuenta con mayor cantidad de fibra su falla es parcial y obtiene un resultado de 720 kg de resistencia, mientras que en (b) se evidencian dos tipos de fallas, ambas completas, con un resultado promedio de 600 kg. Cabe destacar que los cocos seleccionados para la prueba contaban con tamaño y peso similar, con un promedio de 182 g y su forma era ovalada.



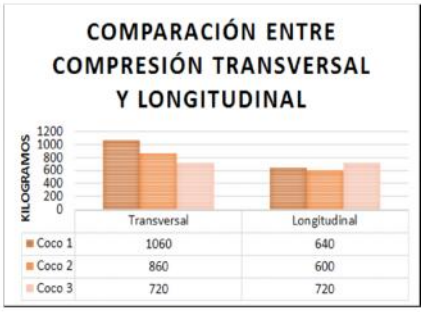
Figura 11. Muestras de coco sometidas a pruebas de compresión en posición vertical (a) y horizontal (b). Foto tomada de la máquina de ensayo universal WPM.

Al comparar el comportamiento mecánico en las muestras en sección, con o sin pulpa, se determinó que los mejores resultados eran arrojados por las muestras en sección transversal como se evidencia en la *Tabla 1*, adicional a ello, dentro de estas muestras se registró que el comportamiento de los hemisferios superior e inferior es similar. Por último, se determinó que la pulpa, analizada en una muestra independiente (sin capas) tenía un margen mínimo de resistencia, siendo las muestras que menores resultados arrojaron.

Consecuentemente, con los resultados analizados se determinó que las fibras brindan a la muestra mayor capacidad de resistencia, sea por la cantidad o por la dirección en las que estén dispuestas, el resultado puede variar. Del mismo modo se identifica que, de las morfologías estudiadas, son las formas ovoides (presente en el endocarpo) y estructuras ramificadas (presentes en las fibras), las más relevantes. Caso contrario con las triangulares, que se comporta como un refuerzo adicional más no significativo en el comportamiento general del coco.

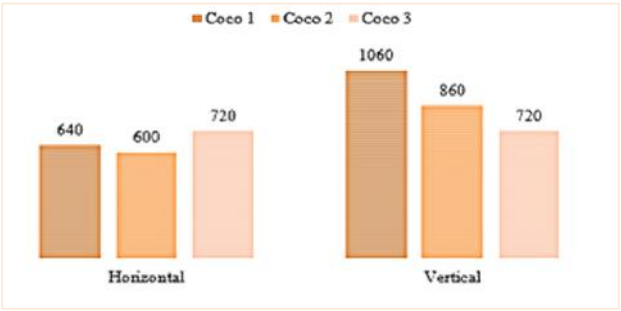
Tabla 1. Comparación entre los resultados de las pruebas de compresión en muestras en sección longitudinal - transversal con pulpa y sin pulpa

Sección transversal sin pulpa.		Sección longitudinal sin pulpa.
1´- Peso: 107g Resultado: 800Kg	1 - Peso: 85g Resultado: 500Kg	1 - Peso: 98g Resultado: 920Kg
2´- Peso: 86g Resultado: 1060kg	2 – Peso 90g Resultado: 720Kg	2 – Peso 90g Resultado: 680Kg
3´- Peso: 94 g Resultado: 1040Kg	3 – Peso: 71g Resultado: 480Kg	3 – Peso: 100g Resultado: 360Kg



En cuanto al comportamiento de los cocos enteros en la prueba de compresión, se registraron mejores resultados por aquellos cocos ubicados en una posición vertical, como se observa en la Tabla 2, teniendo en cuenta que las fibras y la dirección de la fuerza era en el mismo sentido, tal y como se observa en la

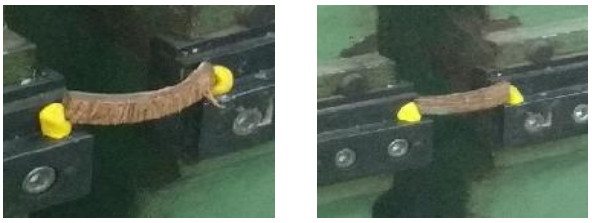
Tabla 2. Comparación de resultados de cocos enteros ubicados vertical y horizontalmente en la prueba de compresión



6.2.2. Comportamiento mecánico en las pruebas de impacto

Los resultados obtenidos de esta prueba no presentaron cambios destacados, a pesar de tener muestras con diversas características, teniendo en cuenta que la prueba se realizó con un martillo de 30 kg y posteriormente por uno de 15 kg. En cuando a los resultados, la dirección de las fibras influye directamente, como puede observarse en la *Figura 12*. En las muestras con las fibras verticales el corte fue irregular, pero la

absorción de energía se mantuvo estable en comparación con las probetas con las fibras en dirección horizontal. Sin embargo, las muestras con mayores resultados fueron aquellas a las que se le propició el golpe en la dirección contraria a las fibras. Estos resultados corresponden a la prueba realizada con el martillo de 15 kg.

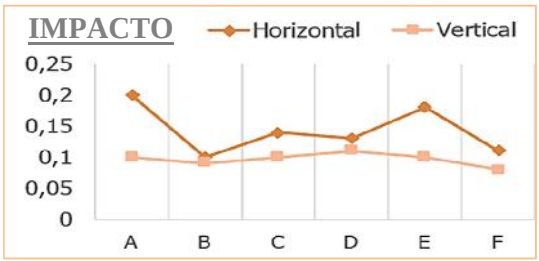


Disposición vertical Disposición horizontal

Figura 12. Posicionamiento de probetas para prueba de impacto con distribución de fibras vertical y horizontal

Por otro lado, las muestras con las fibras dirección vertical que contenían una línea divisoria o "vena" presentaban valores levemente superiores a las demás muestras verticales. El promedio general de resistencia al impacto en el martillo de 15 kg fue de 0,15 J, como se puede analizar en la Tabla 3 Al realizar la prueba a probetas de endosperma se presentaron valores superiores en comparación a las anteriores, siendo la probeta (E) la de mayor absorción de energía. (Anexo 1)

Tabla 3. Gráfica comparativa de resultados de muestras con fibras verticales y horizontales.



7. CONCLUSIONES

1. En la observación macro estructural se identificó que las formas geométricas que presentan mejores condiciones en cuanto a la resistencia de cargas son las formas ovoides (evidentes en la forma del endocarpo) las cuales pueden resistir cargas sin fractura hasta los 400kg dependiendo de la zona donde se realice el esfuerzo. Mientras que las formas triangulares (presentes en la disposición de los poros de germinación) y las estructuras ramificadas (presentes en las fibras) se comportan como refuerzos que brindan una mayor distribución de energía o fuerza aplicada, reduciendo probabilidad de rupturas.

2. La disposición de las fibras de manera vertical obtiene mejores resultados en cuanto a resistencia en las pruebas de compresión, en donde la fuerza aplicada es en el mismo sentido de las fibras. Por el contrario, en la prueba de impacto, los mejores resultados se adquieren cuando la dirección de las fibras es perpendicular a la dirección del golpe. Por lo tanto, se concluye que la dirección influye en la capacidad de resistencia mecánica.

3. Según los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas, tanto de impacto como de compresión, en relación con la información arrojada por la caracterización morfológica, se evidenció que, a mayor cantidad de fibra, mayor absorción y distribución de energía. Siendo la zona inferior la parte con mayor cantidad de fibras, se afirma entonces que, éste es el área con mejores propiedades mecánicas.

8. REFERENCIAS

Amaya & Aurelio (2012) *Estudio experimental para detectar fallas en estructuras del tipo truss por medio de análisis vibracional*. Universidad autónoma de Querétaro. Recuperado de: http://ri.uaq.mx/handle/123456789/5441

Bejan, A (2007) *Teoría constructiva de la formación de patrones,* Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 753-768. Recuperado de: https://doi.org/10.5194/hess-11-753-2007

Franco, S. (2011) *Materiales y materias primas.* Recuperado de: http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf

Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel (2000) *A history of the principal developments and applications of the force density method in Germany 1970-1999.* Recuperado de: http://www.technet-gmbh.de/fileadmin/Leichte_Flaechentragwerke/Publikationen/Density2.pdf

Lasser, T. (2013) *Acta Botánica Venezuélica*. Instituto Experimental Jardín Botánico. *Resistencia al impacto*. Rescatado de: http://www.ensinger.es/es/informacion-tecnica/propiedades-tecnicas-de-los-plasticos/propiedades-mecanicas/resistencia-al-impacto

Rodríguez, L. (2014). *Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano* (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Obtenido de: http://www.bdigital.unal.edu.co/47022/#sthash.iZCDKX3Y.dpuf

Sánchez, M & Maldonado, L. (2013). *¡Ah, qué huevos tiene la ciencia!* Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Recuperado de: http://publicaciones.ujat.mx/cientificas/Documentos/Ciencia/22/Ah%20qué%20huevos%20tiene%20la%20ciencia.pdf

Taborda, J. (2014). *Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada.* (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica De Pereira, Risaralda. Recuperado de: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4466

Trujillo, A & Arias, L. (2013). *The coconut, a renewable resource for the design of green materials.* Universidad Católica de Pereira. Recuperado de: http://biblioteca.ucp.edu.co/OJS/index.php/entrecei/article/view/2240

Ureña, M & Rojas, Á. (2015). *Adición de la fibra de coco en el hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión.* Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de: http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/17066

9. ANEXOS

Anexo 1

Línea de Investigación en MORFOLOGÍA experimental

Investigadores: Sara Arévalo Londoño; Paula A. Pineda Ortiz; María I. Serna Sierra.

Fecha: 7 de septiembre 2017 | Actividad: Prueba de impacto

Universidad Pontificia Bolivariana

N° de muestra	Registro	Resultado	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Comentarios	Observaciones
A		4.9 J		X		Golpe en el mismo sentido de las fibras	1. Los cortes transversales tienen mayor resistencia cuando el golpe propiciado se da en el mismo sentido de las fibras
A'		4,8 J		X		Golpe en el mismo sentido de las fibras	2. Las muestras más grandes y con mayor curvatura tienen mayores valores en la absorción de energía
B		7,84 J		X		Mayor área y con mayor curvatura - Golpe en el mismo sentido de las fibras	3. Las muestras tomadas del Endospermo cuentan con el segundo valor más alto en la absorción de energía
B'		15,19 J			X	**Mayor área que la anterior y con mayor curvatura - Golpe en el mismo sentido de las fibras**	
C		0,98 J	X			Golpe en sentido contrario de las fibras - tamaño de la probeta estandar	**Conclusiones**
D		7,35 J		X		Muestra tomada del endospermo con las fibras en sentido horizontal (golpe en sentido contrario a las fibra)	Se requieren pruebas posteriores con la herramienta de 15kg en la máquina de péndulo para la prueba de impacto. Adicional a ello se requiere analizar muestras de mayor tamaño de capas individual y en conjunto, en el caso del endocarpo con el endospermo
D'		10,78 J			X	Muestra tomada del endospermo con las fibras en sentido horizontal (golpe en sentido contrario a las fibra) cuenta con el mismo largo pero con mas curvatura que la anterior	
E		11,27 J			X	Muestra con mayor área, toma de la sección longitudinal de la drupa, el golpe se le realiza en sentido contrario a las fibras	
F		3,43 J	X			Golpe en el mismo sentido de las fibras	
F'		1.96 J	X			Fibras en sentido contrario	

Estudio de la morfología de la drupa del coco en relación a su comportamiento mecánico

Sara Arévalo Londoño, Maria Isabel Serna Sierra, Paula Andrea Pineda Ortiz.*
Facultad Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia
* sara.arevalo@upb.edu.co

Resumen

Esta investigación se centra en el análisis de la drupa de coco, teniendo en cuenta su configuración morfológica y su relación con respecto al comportamiento frente al impacto. Con eso se pretende brindar información útil para el desarrollo y planteamiento de nuevas soluciones de diseño frente a la problemática expuesta. Para llevar a cabo esta investigación se realizó la caracterización morfológica macro y micro estructural de la drupa del coco, además de la exposición a pruebas de impacto y compresión. Esto permitió determinar al endocarpo y a la fibra de coco como elementos fundamentales para la abstracción de morfologías en relación con su comportamiento mecánico. Del mismo modo, variables como la disposición interna de la fibra y la cantidad de la misma son factores determinantes en su comportamiento frente al impacto.

Abstract

This research focuses on the analysis of coconut palm, taking into account its morphological and relating this with its behavior against impact. With this, a solution can be arrived at for the development and the design of new design solutions in the face of the aforementioned problems. To carry out this research, the macro and micro structural morphological characterization of the coconut drupe was carried out, as well as exposing them to impact and compression tests. This is to determine the endocarp and the coconut fiber as fundamental elements for the abstraction of the morphologies in the relationship with their mechanical behavior. In the same way variables such as the internal arrangement of the fiber and the amount thereof are determining factors in its behavior against impact.

Palabras Clave: *drupa de coco, morfología, resistencia mecánica, diseño industrial*

1 INTRODUCCIÓN

Los seres vivos y algunos objetos naturales al pasar los años van mostrando cambios en su forma y estructura, presentando daños y malformaciones que terminan afectando su correcto funcionamiento, así mismo sucede con los materiales creados por el hombre, sea por condiciones como intemperie, antigüedad o uso, siendo este último el más influyente y razón por la cual guardan relación con exposición a impactos y esfuerzos. Los objetos entonces van enfrentándose a cambios que se ven posteriormente reflejados en su función. Como solución a esto se han aplicado algunos aditamentos al material o al producto aumentando así el volumen, forma y peso del mismo, provocando en últimas la reducción de su aplicabilidad y usabilidad. Sin embargo, la naturaleza ha empleado estrategias que brindan protección y resistencia a objetos naturales, como es el caso de las drupas, frutos conformados por diversas capas y una semilla en su interior. Dentro de este grupo se encuentra el coco, el cual por medio de su composición estructural es caracterizado por su alta resistencia al impacto, aportándole al fruto una mayor protección y capacidad de absorción de energía.

La drupa del coco está constituida de afuera hacia adentro por una corteza verdosa llamada exocarpo, la cual contiene otra envoltura fibrosa llamada mesocarpio (fibra), seguido por el endocarpio (hueso), del cual se desprende una capa delgada y milimétrica llamada Testa que se encuentra adherida a la última capa llamada endosperma (pulpa). El endocarpio es un material duro, de unos cinco milímetros de espesor, el cual cubre la pulpa comestible o endospermo. Este último, de color blanco, corresponde a la parte comestible cuyo interior alberga un líquido opalino y azucarado conocido como el agua de coco. Este líquido llena las tres cuartas partes de la cavidad central del fruto (Taborda, 2014).

A través de la disposición de sus múltiples capas y de la morfología macro y micro estructural el fruto cuenta con capacidades de absorción de energía y tenacidad requeridas para soportar golpes e impactos sin perjudicar la semilla. Tal cual como se expone en la Figura 1 desde un corte transversal (a), las capas de la drupa tienen diferentes espesores, consistencias, colores y geometrías (b). Adicional a ello, tiene regiones, a los cuales se les asigno una denominación dentro de la investigación (c).

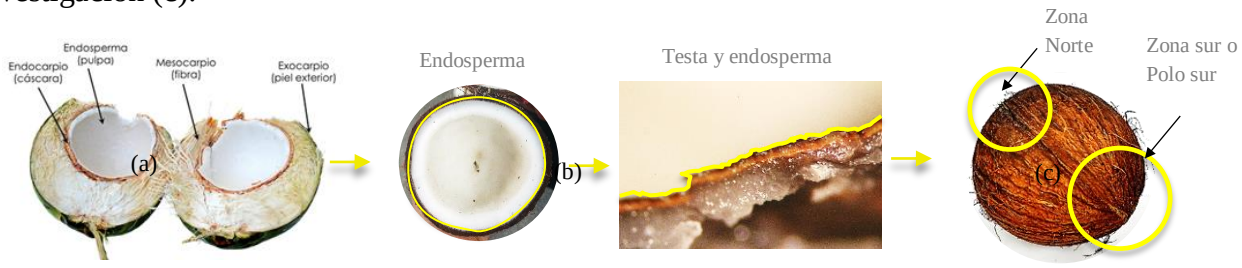


Figura 1. Partes de la drupa del coco, diferenciación de las capas en el corte transversal (a) (Barres, L. 2016), Testa y endosperma (b) y zonas del coco (endocarpo) (c).

En este trabajo se busca identificar las características morfológicas que brindan a la drupa del coco mayor resistencia al impacto. Para esto se definió que es necesario plantearse en primer lugar la identificación de la morfología presente de la drupa de coco para establecer patrones formales y estructurales; en segundo lugar, caracterizar el comportamiento mecánico de la drupa de coco con el fin de establecer su resistencia al impacto; y en consecuencia, en tercer lugar establecer la relación encontrada entre la caracterización morfológica y el comportamiento mecánico lo cual, podrá ser potencialmente aplicado a elementos ortopédicos, de embalaje, la mejora de algunos artefactos o materiales existentes que se encuentren expuestos a colisiones constantes o esporádicas, alargando así su durabilidad y resistencia.

2 METODOLOGÍA

En la caracterización morfológica se realizó una observación macroestructural, que aportó a la información obtenida de la indagación inicial. Posterior a ello se realizó la división de las capas de la drupa y se procedió con la toma de muestras. Estas fueron comparadas por forma, color, peso, densidad y dimensión. Después de analizar la información obtenida, se consignó en tablas que permitieron evidenciar las diferencias y realizar comparaciones detalladas a partir de la relación entre la morfología y el comportamiento mecánico.

Para poder realizar las pruebas de resistencia y comparar los registros de manera precisa, se requirió la estandarización de probetas, las cuales, tenían una dimensión de 1 x 3 cm, que fueron seleccionadas según las zonas con mayor potencial para la absorción de energía y por los análisis realizados en las pruebas preliminares. Los resultados obtenidos tanto en las pruebas de impacto ejecutados en el Péndulo Charpy WPM con martillos de 30 y 15 kg; como en las pruebas de compresión realizadas en la máquina de ensayo universal WPM con celda de carga de 4 toneladas, se tabularon y se compararon con apoyo de gráficas porcentuales, relacionando su dimensión, peso, y origen (ubicación en el coco).

Las probetas realizadas para la prueba de impacto fueron en total 36, repartidas en dos análisis preliminares cada uno con 9 probetas y un último análisis de 18 probetas separadas según la zona. Las zonas se nombraron por letras de la A-F. En el caso de la prueba de compresión se realizaron en total 46 ensayos en donde se analizaron inicialmente 2 cocos verticalmente y 2 horizontalmente, esto para las pruebas preliminares, posterior a ello se analizaron 3 cocos por cada posición. Por otro lado, se compararon 18 secciones transversales y 18 longitudinales de las cuales solo la mitad de las probetas estaban sin pulpa. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente.

A lo largo del proceso se realizaron análisis microscópicos con un estereomicroscopio Olympus y registrados empleando una cámara Canon EOS rebel t5i; esto, con la intención de identificar los cambios morfológicos en relación con las pruebas mecánicas. Toda la información obtenida, fue

consignada en tablas de registro, en este caso la tabla morfológica microestructural, la cual sirvió como sustento para la realización de abstracciones de patrones morfológicos.
En el transcurso de la investigación, se realizaron diversos registros fotográficos y de video, que sirvieron de apoyo para el análisis, comparación y estudio general de los hallazgos presentados en cada etapa.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de realizar los diferentes ensayos se encontró que la distribución de las fibras verticalmente (en su corteza o endocarpo), combinado con la distribución de estas a través de las capas (intersectándose y uniendo una con otra); crean una especie de malla que potencia la absorción y distribución de energía frente al impacto, dicha consideración se realiza con base al estudio de las mallas realizado por (Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel, 2000). Del mismo modo, el crecimiento relacionado con las 3 direcciones de las líneas divisorias o "venas", se comportan como refuerzos para la corteza; factores que le brindan capacidades de resistencia mecánica con respecto al impacto y a la compresión. Lo anterior, da un indicio acerca de la relación de la disposición de las fibras con respecto a su comportamiento mecánico, pues las propiedades mecánicas de fibras vegetales dependen del tipo de celulosa y la geometría de la celda elemental (Taborda, 2014), la cual a su vez está relacionada con la disposición de las fibras en el espécimen.

Por otra parte, las formas geométricas encontradas en la observación macro estructural de la drupa fueron ovoides, triangulares y estructuras ramificadas. La primera, reflejada en la forma del coco, partiendo del epicarpo (capa externa de la drupa) hacia el cotiledón (pulpa líquida). Dichas capas, se inscriben en una figura ovoide como se aprecia en la Figura 2 (a) y se consideran estructuralmente resistentes debido a la repartición de sus fuerzas, explicado a fondo por (Sánchez & Maldonado, 2013) en el análisis de la geometría del huevo (b). La segunda forma, se ve reflejada en la disposición triangular en los poros de germinación (c). La forma triangular es considerada "la forma geométrica más simple y resistente" (Amaya & Aurelio 2012), lo que la convierte en factor pertinente debido a sus características estructurales las cuales constan de "ser la única forma que no se deforma cuando sobre éste actúa una fuerza" (Vázquez, 2012). La tercera, denominada estructura ramificada se ve evidenciada en el crecimiento de las fibras, lo que permite vislumbrar la distribución de energía a lo largo del coco (d). Este análisis se basa en la ley constructiva que según (Bejan. A, 2007) consta de patrones que determinan la vía más eficiente para un flujo determinado, en otras palabras, las vías con el menor esfuerzo. Esta estructura permite entonces considerar que el punto de esfuerzo en donde el fruto recibe la fuerza canaliza la energía recibida y la distribuye, reduciendo las posibilidades de deformación y ruptura.

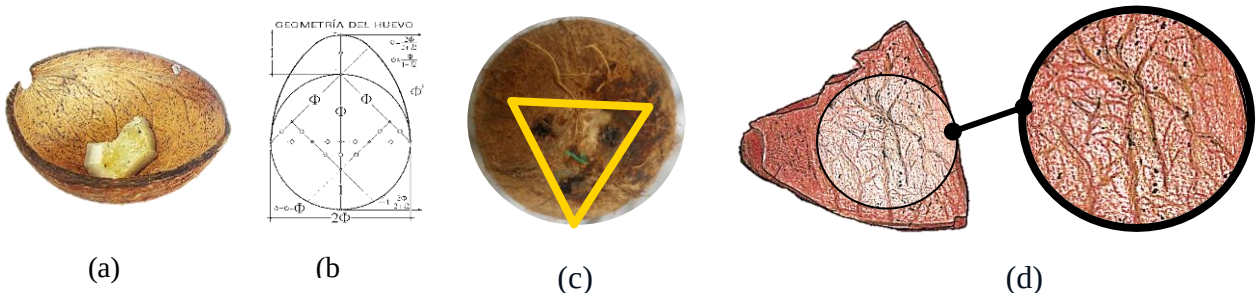


Figura 2. Fotografías del espécimen en corte longitudinal (a), Estudio de la geometría del huevo (b), distribución de los poros de germinación (c), recreación del crecimiento en estructura ramificada de las fibras al interior del endocarpo

En cuanto a la observación microestructural, en el análisis del endosperma, se encontraron formas baciliformes las cuales se encuentran aglomeradas unas con otras y tienen una distribución radial con respecto al centro del fruto como se presenta en la Figura 3 (a), en donde se ve reflejado la dirección del crecimiento de la pulpa. De igual forma, al interior de las fibras se hallaron patrones conformados por elementos esféricos en cadena, que tenían coalición con otras semejantes por medio de filamentos redondeados y no definidos. Todo esto era contenido por dos capas externas que tenían una corteza irregular, como se muestra en la Figura 3 (b). Del mismo modo se abstrajeron patrones a partir de micrografías (c). Estas fueron obtenidas de fibras ubicadas en el endocarpo las cuales conformaban una red de formas acanaladas entrelazadas distanciadas entre sí por una medida repetitiva, además de encontrarse intercaladas entre hileras. Esta disposición se repetía por capas superpuestas. Esta disposición puede ser considerada como superficie mallada permitiendo una mejor distribución de energía frente al impacto como se analiza en estudios de resistencia de las mallas realizado por (Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel, 2000).

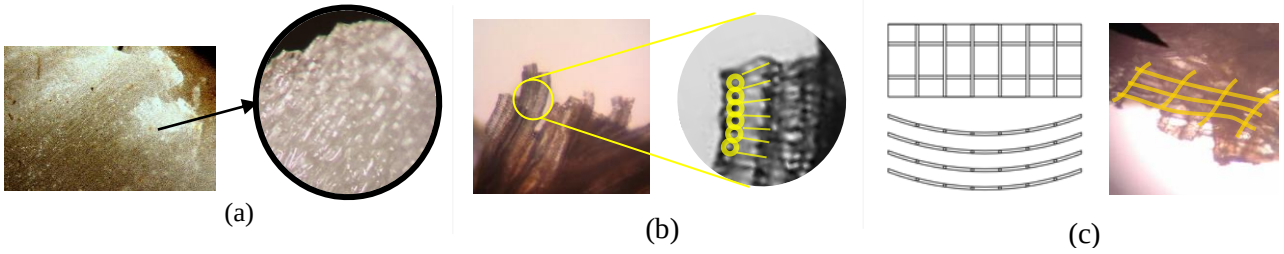


Figura 3. Micrografía de la sección del endosperma con aumento ocular de 20x (a). Micrografía de fibra exterior con aumento ocular de 20x (a). Patrón abstraído del endosperma observado desde el estereomicroscopio (b).

Durante la prueba de compresión se analizó que los resultados dependen directamente de la dirección en la que se posiciona el coco, esto en relación con el sentido y cantidad de fibras como se observa en la Figura 4. En este caso se evidencian la diferencia de fallas al posicionar el coco con las fibras verticales (a) y con las fibras horizontales (b), en donde (a) cuenta con mayor cantidad de fibra su falla es parcial y obtiene un resultado de 720 kg de resistencia, mientras que en (b) se evidencian dos tipos de fallas, ambas completas, con un resultado promedio de 600 kg. Esto deja como resultado que las posición vertical con respecto al esfuerzo, es más resistente, tal y como se

compara en la Figura 4 (c). Cabe destacar que los cocos seleccionados para la prueba contaban con tamaño y peso similar, con un promedio de 182 g y su forma era ovalada.

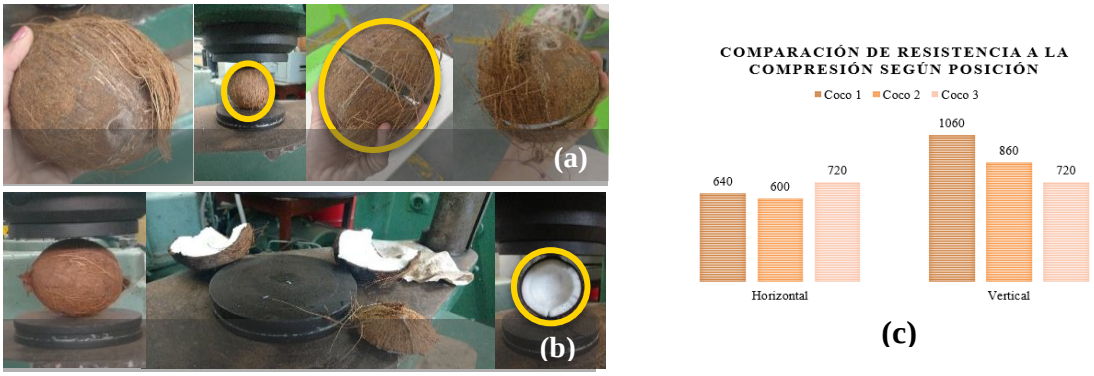


Figura 4. Muestras de coco sometidas a pruebas de compresión con disposición vertical (a) y horizontal (b). Tabla comparativa según resultados y posición (c)

En cuando a los resultados obtenidos en la prueba de impacto, la dirección de las fibras influye directamente, como puede observarse en la Figura 5. Las muestras con mayores resultados fueron aquellas a las que se le propició el golpe en la dirección contraria a las fibras, es decir en posición vertical (a) a comparación de la posición horizontal (b). El promedio general de resistencia al impacto en el martillo de 15 kg fue de 0,15 J, como se puede analizar en la Figura 5 (c). Al realizar la prueba a probetas de endosperma se presentaron valores superiores en comparación a las anteriores, siendo la probeta (E) la de mayor absorción de energía.



(a) (b) (c)

Figura 5. Fotografías de probetas (A) fibras dirección vertical, (B) dirección horizontal, (C) línea divisoria (E) mayor absorción de energía

4 AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigación agradece a Carlos René Muñoz Jiménez, Técnico de laboratorios de Materiales y a Daniel Peláez Cuellar, Docente Investigador del departamento de ingenierías, por su orientación y apoyo en el desarrollo de pruebas y validaciones de la investigación. Así mismo a Alejandro Zuleta y Diana Urdinola, asesores de la línea de investigación en Morfología Experimental por sus opiniones y comentarios que fueron útiles para la conceptualización, utilidad y definición del diseño o propuesta final por parte nuestra

5 CONCLUSIONES

1. En la observación macro estructural se identificó que las formas geométricas que presentan mejores condiciones en cuanto a la resistencia de cargas son las formas ovoides (evidentes en la forma del endocarpo) las cuales pueden resistir cargas sin fractura hasta los 400kg dependiendo de la zona donde se realice el esfuerzo. Mientras que las formas triangulares (presentes en la disposición de los poros de germinación) y las estructuras ramificadas (presentes en las fibras) se comportan como refuerzos que brindan una mayor distribución de energía o fuerza aplicada, reduciendo probabilidad de rupturas.

2. La disposición de las fibras de manera vertical obtiene mejores resultados en cuanto a resistencia en las pruebas de compresión, en donde la fuerza aplicada es en el mismo sentido de las fibras. Por el contrario, en la prueba de impacto, los mejores resultados se adquieren cuando la dirección de las fibras es perpendicular a la dirección del golpe. Por lo tanto, se concluye que la dirección influye en la capacidad de resistencia mecánica.

3. Según los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas, tanto de impacto como de compresión, en relación con la información arrojada por la caracterización morfológica, se evidenció que, a mayor cantidad de fibra, mayor absorción y distribución de energía. Siendo la zona inferior la parte con mayor cantidad de fibras, se afirma entonces que, éste es el área con mejores propiedades mecánicas.

6 REFERENCIAS

Amaya & Aurelio (2012) *Estudio experimental para detectar fallas en estructuras del tipo truss por medio de análisis vibracional*. Universidad autónoma de Querétaro. Recuperado de: http://ri.uaq.mx/handle/123456789/5441

Bejan, A (2007) *Teoría constructiva de la formación de patrones*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 753-768. Recuperado de: https://doi.org/10.5194/hess-11-753-2007

Franco, S. (2011) *Materiales y materias primas.* Recuperado de: http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf

Gründig; Moncrieff; Singer & Ströbel (2000) *A history of the principal developments and applications of the force density method in Germany 1970-1999.* Recuperado de: http://www.technet-gmbh.de/fileadmin/Leichte_Flaechentragwerke/Publikationen/Density2.pdf

Sánchez, M & Maldonado, L. (2013). *¡Ah, qué huevos tiene la ciencia!.* Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Recuperado de: http://publicaciones.ujat.mx/cientificas/Documentos/Ciencia/22/Ah%20qué%20huevos%20tiene%20la%20ciencia.pdf

Taborda, J. (2014). *Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada.* (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica De Pereira, Risaralda. Recuperado de: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4466