

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Uso de la Cáscara de Cacao Como Fuente Primaria Para la Obtención de Materiales Aplicado a la Ingeniería Mediante el Estudio de las Propiedades Mecánicas

Jeison Alejandro Molano Pinzón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia

2021

Uso de la Cáscara de Cacao Como Fuente Primaria Para la Obtención de Materiales Aplicado a la Ingeniería Mediante el Estudio de las Propiedades Mecánicas

Jeison Alejandro Molano Pinzón

Trabajo final de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

PhD., MSc. Carolina María Sánchez Sáenz

Línea de Investigación:

Aprovechamiento de residuos agroindustriales

Grupo de Investigación:

Ingeniería de Biosistemas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2021

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por permitirme llegar a este punto en mi vida académica. A mi familia y amigos que colocaron su granito de arena para cumplir uno de mis sueños más añorados. Gracias a mi esposa y padres por la motivación y fuerza que diariamente me daban y por soportar esas largas jornadas de trabajo. Adicional, agradezco a mi directora de tesis de trabajo final por su apoyo incondicional desde el inicio hasta el final de este proyecto. Simplemente gracias y que Dios me siga iluminando en este camino hacia la grandeza.

“Sigue hambriento, sigue loco”

Steve Jobs

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre

Jeison Alejandro Molano Pinzón

Fecha 15/10/2021

Agradecimientos

Quiero agradecer inmensamente a Dios que es quien me brinda la oportunidad de crecer cada día, quien me enseñó la fórmula de que, si a la esperanza se le pone fe, a esa fe se le agrega amor todo se puede lograr.

A mi esposa Yisel García por su amor, paciencia, oración y cuidados, quien me motiva a seguir mejorando y a esforzarme cada día, pues aun cuando mis ánimos parecían decaer, me ayudo con muchas tazas de café y palabras amorosas y motivantes para seguir en pie de lucha por un futuro mejor para los dos.

A mis Padres, Pedro Molano y Clara Pinzón quienes han sido un gran ejemplo en mi camino para lograr mis metas con palabras y gestos de amor que me hicieron superar y creer que lo que me proponga se puede lograr a pesar de las adversidades de la vida.

A mis amigos y compañeros por sus consejos y apoyo, aun cuando a veces ni siquiera tuve tiempo para responder a tiempo un mensaje o una llamada por estar ocupado. También quiero agradecer a mi empresa y jefes de Galqui S.A.S a la cual pertenezco, pues me brindaron la oportunidad de trabajar para sostener mi hogar y cada día crecer como profesional.

A mi Profe, tutora de tesis Carolina María Sánchez Sáenz, del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, quien creyó en mí, me apoyo y guio, brindándome sus conocimientos desde el momento en que le comenté la idea. Me motivo con su paciencia, entusiasmo y su gran vocación la cual me permitió continuar con este gran paso en mi carrera profesional en la Universidad de la cual siempre soñé ser parte y poder brindar un granito de arena a nuevas ramas del conocimiento.

Y de nuevo a Dios, gracias, gracias, con todo el corazón gracias, porque ¡Al que cree todo le es posible!

Resumen

Los sub-productos generados por el cacao, se pueden aprovechar haciendo uso de estos en el campo de la ingeniería de materiales. Se puede determinar las propiedades mecánicas de la cascará de cacao acompañado de un tipo de aglutinante por medio de ensayos realizados en un laboratorio como lo son: tensión, flexión, compresión e impacto. Los resultados obtenidos, se presentan en el diagrama esfuerzo VS deformación donde se logra deducir con qué tipo de material se está tratando y que propiedades presenta. El objetivo de este trabajo final de maestría, fue analizar los sub-productos de cacao generados durante los procesos de producción como sustituto de materiales empleados en la ingeniería. En algunas investigaciones, el aprovechamiento de productos agroindustriales se hace más evidente, pues son la materia prima para producir nuevos materiales o productos evitando así tanto desperdicio y evitar daños ambientales.

La metodología se basó en la fabricación de 9 probetas para cada uno de los ensayos para un total de 36. Se realizaron grupos de tres probetas con porcentajes volumétricos del 50%, 70% y 90% de cáscara de cacao triturado. En conclusión, debido a los esfuerzos obtenidos y en comparación con otros materiales aplicados al campo de la ingeniería, el material compuesto con cáscara de cacao es similar a la madera en lo que respecta a sus propiedades mecánicas.

Palabras Clave: Ensayos mecánicos, esfuerzo, deformación

Abstract

Use of the cocoa shell as a primary source for obtaining materials applied to engineering through the study of mechanical properties

The by-products generated by cocoa can be exploited by making use of these in the field of materials engineering. It is possible to determine the mechanical properties of the cocoa shell accompanied by a type of binder by means of tests carried out in a laboratory such as: tension, bending, compression and impact. The results obtained are presented in the stress VS deformation diagram where it is possible to deduce what type of material is being treated and what properties it presents. The objective of this final master's thesis is to analyze the cocoa by-products generated during the production processes as a substitute for materials used in engineering. In some investigations, the use of agro-industrial products becomes more evident, since they are the raw material to produce new materials or products, thus avoiding so much waste and avoiding environmental damage.

The methodology was based on the manufacture of 9 specimens for each of the tests for a total of 36. Groups of three specimens were made with volumetric percentages of 50%, 70% and 90% accompanied with a binder. In conclusion, due to the efforts obtained and compared to other materials applied to the field of engineering, the composite material with cocoa shell is similar to wood in terms of its mechanical properties.

Keywords: Mechanical test, stress, deformation

Contenido

	Pág.
1. Introducción	19
2. Justificación	21
3. Antecedentes.....	22
4. Objetivos.....	30
4.1 Objetivo General	30
4.2 Objetivos específicos	30
5. Desarrollo De Los Paquetes De Trabajo.....	31
5.1 Paquete de trabajo No. 1.....	31
5.1.1 Ensayos mecánicos realizados a los materiales	31
5.1.2 Ensayos Seleccionados y Cantidad de muestras a estudio	36
5.1.3 Pre-alistamiento de la cáscara de cacao	39
5.1.4 Fabricación de las probetas	46
5.2 Paquete de trabajo No. 2.....	51
5.2.1 Ensayo de Tensión	53
5.2.2 Ensayo de Compresión.....	59
5.2.3 Ensayo de Flexión	63
5.2.4 Ensayo de Impacto	67
5.2.5 Materiales aplicados en el campo de la Ingeniería.....	70
5.3 Paquete de trabajo No. 3.....	73
6. Conclusiones y recomendaciones.....	78
6.1 Conclusiones.....	78
6.2 Recomendaciones.....	80
7. Bibliografía	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los materiales. Tomado de [3].....	23
Figura 2. Theobroma de Cacao L. Tomado de [7]	24
Figura 3. Estructura y desechos de la cascara de cacao. Tomado de [8]	25
Figura 4. Cáscara de cacao sin secar VS seca. Tomada de [10]	26
Figura 5. Espumas con sustratos de cacao. Libre crecimiento de la raíz. Tomado de [13]	27
Figura 6. Diagrama de flujo. Tomado de [14]	28
Figura 7. Probetas Para Ensayos de Tracción. ASTM D-638-14. Tomado de [15]	29
Figura 8. Diagrama Esfuerzo vs Deformación. Tomado de [15]	29
Figura 9. Máquina Universal de ensayos UH-AC [28].....	32
Figura 10. Diagrama esfuerzo VS deformación. Tomado de [29]	33
Figura 11. Ensayo de compresión. Tomado de [30]	33
Figura 12. Máquina. Prueba de Impacto. Tomado de [27]	34
Figura 13. Ensayo de Flexión. Izquierda: Disposición equipo VS material. Derecha: Resultado final del ensayo. Tomado de [27]	35
Figura 14. Montaje de un ensayo de fatiga. Tomado de [27]	35
Figura 15. Montaje de un ensayo de torsión. Tomado de [27]	36
Figura 16. Dimensiones probeta de Tensión. Tomada de [31]	37
Figura 17. Materia prima. Cáscara de Cacao. Elaboración propia.....	39
Figura 18. (a) Proceso de corte, (b) tirillas de Cacao, (c) Presencia de hongos y (d) Fabricación de la probeta. Elaboración propia	40
Figura 19. (a) Resultado Final. Secado natural y (b) Medidor de contenido de humedad. Elaboración propia.	42
Figura 20. (a) Molino triturador, (b) Medición agujeros del Tamiz. Elaboración propia....	42
Figura 21. Resultado de la trituración (a) Seco, (b) Húmedo	43
Figura 22. (a) Disposición de material en Icopor, (b) Tamizadora electrónica, (c) Pesaje 1 del material. Elaboración propia	44
Figura 23. (a) Probeta con partículas de cacao, (b) Pesaje en balanza electrónica. Elaboración propia	45
Figura 24. (a) Micrografía de ferrita, (b) Micrografía de austenita. Tomado de [40]	46
Figura 25. (a) Corte Láser, (b) Molde de tracción, (c) Molde de Impacto, (d) Molde de flexión. Elaboración propia	47
Figura 26. Flujo detallado de la elaboración de las probetas. Elaboración Propia	51
Figura 27. Izquierda. Máquina de Ensayos Mecánicos. Derecha. Máquina de impacto Universidad Nacional de Colombia	52
Figura 28. Probetas de Tensión (Color Azul), Flexión (Color Naranja), Impacto (Color Rojo) y Compresión (color negro). Elaboración propia	53

Figura 29. (a) Probeta sin Romper, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza.
Elaboración propia (Tensión)..... 54

Figura 30. Diagrama Esfuerzo VS Deformación. Porcentaje de cáscara de Cacao del 50%
Elaboración propia..... 56

Figura 31. Diagrama Esfuerzo VS Deformación. Porcentaje de cáscara de Cacao del 70%
Elaboración propia.... 56

Figura 32. Diagrama Esfuerzo VS Deformación. Porcentaje de cáscara de Cacao del 90%
Elaboración propia..... 57

Figura 33. (a) Disposición de la probeta, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza.
Elaboración propia (Compresión) 59

Figura 34. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de Cacao del 50%
Elaboración propia..... 61

Figura 35. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de Cacao del 70%
Elaboración propia..... 62

Figura 36. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de Cacao del 90%
Elaboración propia..... 62

Figura 37. (a) Disposición de la probeta, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza.
Elaboración propia (Flexión) 64

Figura 38. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de cacao del 50%
Elaboración propia..... 65

Figura 39. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de cacao del 70%
Elaboración propia..... 66

Figura 40. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de cacao del 90%
Elaboración propia..... 66

Figura 41. (a) Disposición de la probeta, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza.
Elaboración propia (Impacto)..... 68

Figura 42. Parámetros del equipo [A]. Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL 69

Figura 43. Parámetros del equipo [A]. Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL 69

Figura 44. Descomposición de algunos materiales. Tomado de [45] 71

Figura 45. (a) Fractura. Probeta de tensión e impacto, (b) Ampliación probeta de Impacto, (c) Ampliación probeta de tensión 74

Figura 46. (a) Puntos intersticiales, (b) Superficie de fractura, (c) Interfaz cáscara de cacao vs. aglutinante – En mayor proporción, y (d) Interfaz cáscara de cacao (Color marrón) vs. Aglutinante (Color blanco) 75

Figura 47. Imágenes Metalográficas. Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL 80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Porcentajes de humedad. Elaboración propia.....	41
Tabla 2. Peso resultado del proceso de Tamizaje (Unidad en gramos)	44
Tabla 3. Densidades de cada Tamizaje	45
Tabla 4. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de tensión. Elaboración propia	48
Tabla 5. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de flexión. Elaboración propia	48
Tabla 6. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de impacto. Elaboración propia	49
Tabla 7. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de compresión. Elaboración propia	49
Tabla 8. Presiones generadas en cada probeta. Elaboración propia	51
Tabla 9. Medidas Introducidas en el equipo. media y desviación estándar	54
Tabla 10. Resultados obtenidos del Equipo (tensión). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos - UNAL.....	55
Tabla 11. Probetas con 50 % cáscara de cacao. Elaborado por el autor	57
Tabla 12. Probetas con 70 % cáscara de cacao. Elaborado por el autor	58
Tabla 13. . Probetas con 90 % cáscara de cacao. Elaborado por el autor	58
Tabla 14. Medidas Introducidas en el equipo. Media y desviación estándar	60
Tabla 15. Resultados obtenidos del Equipo (compresión). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos - UNAL.....	61
Tabla 16. Medidas Introducidas en el equipo. Media y desviación estándar	64
Tabla 17. Resultados obtenidos del Equipo (flexión). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos - UNAL.....	65
Tabla 18. Resultados obtenidos del Equipo (impacto). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL.....	68
Tabla 19 . Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas. Elaboración Propia	73
Tabla 20. Cuadro Comparativo. Clasificación Tipos de madera. Tomado de [60]	77

Glosario

Es importante, que antes de iniciar con los resultados obtenidos en la investigación, el lector tenga en cuenta una serie de términos que le permitan tener un mayor entendimiento sobre el tema expuesto en el presente trabajo final de maestría. Es por ello, que a continuación, se definen los siguientes conceptos útiles y prácticos para que sean tenidos en cuenta al momento de avanzar con la lectura.

Aglutinante: Sustancia que permite unir dos tipos diferentes de fragmentos o elementos. Ideal para materiales como la madera y cascarilla de cacao.

Anisotrópico: Las propiedades dependen de la orientación del material.

Biodegradable: Elemento, producto o sustancia que se descompone si se aplica un tipo de sustancia química o bajo condiciones naturales. Generalmente, sobre este tipo de materiales son enterrados en el suelo. (También, se emplea el término biodegradabilidad)

Cacao: Es un fruto procedente de América, se destaca por ser empleado en la fabricación del chocolate. Su cascara, puede aplicarse en proyectos investigativos encaminados hacia el uso de materiales de ingeniería.

Continuo: Hace referencia a que el material no presenta porosidades, algo imposible debido a los diferentes procesos de fabricación.

Curva de Ingeniería: O también conocida como esfuerzo VS deformación. Esta gráfica permite conocer algunas propiedades mecánicas como límite elástico, esfuerzo último, punto de rotura, resiliencia, tenacidad, Módulo de elasticidad. Adicional, se puede saber si el comportamiento del material es frágil, o dúctil. Dependiendo de la forma de la curva.

Compresión: Consiste en someter un cuerpo a la acción de dos fuerzas que intentan oprimir o reducir el elemento a estudio. Estas fuerzas se presentan en la misma dirección. Generalmente,

si la fuerza de compresión sobrepasa el esfuerzo que soporta el material se puede presentar una fractura frágil (como en el caso del hormigón), un pandeo o un barrilamiento que es el aumento del área de la sección transversal por efecto de la fuerza generada. Unidad dada en Pascales.

Deformación: Cambio geométrico en el cuerpo como resultado de las fuerzas aplicadas sobre este. Importante resaltar, que la deformación axial es el cambio de longitud por unidad de longitud, generalmente expresada en mm/mm.

Desplazamiento: Es el cambio de posición de un punto con respecto al otro en un instante de tiempo dado. Los datos entregados por la máquina universal de ensayos los manifiesta en unidades milimétricas. (mm)

Densidad: Es la relación entre la masa y el volumen. Se expresa en $\frac{Kg}{m^3}$

Desviación Estándar: Es un término estadístico, que permite conocer qué tan dispersos (lejos) se encuentra de la media. Su símbolo se expresa en σ (sigma). NO se debe confundir con el esfuerzo.

Esfuerzo: Es la relación entre fuerza y área. Expresada en $\frac{N}{mm^2}$ dando MPa.

Fractura dúctil: Es un daño que se genera en un material cuando este se encuentra en su zona plástica durante la propagación de la grieta. En los aceros, cuando son sometidos a tensión, se genera un cuello que se traduce en la reducción de área de su sección transversal.

Fractura frágil: Este tipo de fractura presenta poca deformación plástica y se generan grandes esfuerzos. Generalmente, mayores a los dúctiles. La propagación de la grieta es acelerada.

Flexión: La flexión se genera debido a una carga que se aplica sobre un cuerpo generando un doblamiento. Una vez flexionado, se pueden generar esfuerzos de compresión en la parte cóncava y tensión en la parte convexa.

Fuerza: Es una magnitud vectorial que tiene dirección y es capaz de mover un determinado peso. En cálculos matemáticos es el producto entre la masa, expresada en kg y la aceleración de la gravedad, expresada en $\frac{m}{s^2}$

Isotrópico: Son materiales que en todas sus direcciones sus propiedades son idénticas independientemente del punto dado.

Homogéneo: Es un material que en su estructura interna tiene las mismas características.

Humedad: Es la cantidad de agua existente en algún producto. Esta se puede determinar en base húmeda o en base seca.

Límite de Fluencia: El fin de la zona plástica según el diagrama esfuerzo v.s deformación y el inicio de la zona plástica. Los ingenieros de diseño trabajan por debajo de esta zona a menos

de que se requiera sobrepasar este límite de fluencia por efectos de ingeniería. Su símbolo dentro del diagrama es S_y y se expresa en MPa.

Módulo Elástico: Es una constante, resultado del cociente entre el esfuerzo y la deformación. Estos datos deben ser extraídos de la zona plástica. Sus unidades generalmente son en GPa.

Media: También conocido como promedio, y es la sumatoria de todos los datos dividida entre el total de los datos. Su símbolo es μ . Ver ecuación 4.

Molde: Es un recipiente hueco donde se deposita una sustancia líquida o de masa blanda y que adquiere la misma forma de este. Generalmente, una vez el tiempo de secado, se retira del molde y este se desecha en caso de que se dañe.

Presión: Es la relación entre fuerza y área. Expresada en $\frac{N}{m^2}$ dando Pa. En el sistema Inglés sus unidades se expresan en PSI. No se debe confundir con esfuerzo, este varía dependiendo del contexto en el cual se esté hablando.

Punto de rotura: Este esfuerzo es más pequeño que el esfuerzo último a la tensión. Cuando se sigue aplicando una carga, este se sigue deformando plásticamente. Sin embargo, este esfuerzo se va reduciendo a medida aumenta la deformación hasta finalmente llegar al punto de falla súbita.

Resiliencia: Es una propiedad del material que permite la recuperación de este una vez dejada de aplicar la fuerza en la zona elástica. Se determina, calculando el área bajo la curva bajo esta zona. Sus unidades son en $\frac{J}{mm^3}$

Resistencia a tensión: Es el máximo esfuerzo que puede soportar la probeta antes de llegar al punto de rotura. Su símbolo es S_u y se expresa en MPa.

Rigidez: Hace relación a un material que escasamente sufre deformación debido al esfuerzo aplicado. Generalmente, se encuentran en el grupo de los cerámicos.

Secado: Es un método que se emplea para la conservación de alimentos y evitar la presencia de microorganismos generados por la humedad. Se puede hacer en un horno de convección forzada o secado a lo natural.

Tamiz: Es un elemento que permite separar partículas gruesas en más finas. Generalmente, se hace en un equipo vibratorio. Este movimiento permite separar con mayor facilidad las partículas.

Tenacidad: Es la capacidad que tiene un material de absorber energía antes del punto de rotura. Se calcula hallando el área bajo la curva de la zona plástica y la zona elástica.

Trituración: Básicamente, consiste en reducir un elemento en piezas más pequeñas. Y dependiendo del proceso que se desee realizar, posteriormente se pasan a tamizar para reducir aún más las partículas. En la metodología empleada, se aplicaron ambos procesos.

1. Introducción

El hombre ha experimentado con diferentes materiales de la naturaleza a lo largo de la historia, y con el pasar de los años han presentado cambios no solo en sus propiedades mecánicas, sino en su aspecto en general. Se podría decir que el acero es uno de los materiales más usados en la industria debido a las ventajas que este presenta. Sin embargo, no siempre es el adecuado para determinadas aplicaciones. Hoy en día en el mercado, se encuentran materiales que se clasifican en: Metales, Cerámicos, polímeros y materiales compuestos. Pero debido a la necesidad de preservar el medio ambiente y contribuir con este, investigaciones se han enfocado en el aprovechamiento de los sub-productos de forma general.

Por ejemplo, con los residuos generados por el arroz, mandarina, naranja entre otros, se han reutilizado para la obtención del etanol y generación de nuevas fuentes de energía. Ahora bien, Colombia es un país que cuenta con una gran variedad de productos agroindustriales que aún no han sido explorados en términos del aprovechamiento de los subproductos generados una vez extraídos sus frutos o semillas. Una vez extraídas, en muchas ocasiones no se sabe qué hacer con los desperdicios producidos, pues muchas veces el desconocimiento de las cosas hace que no se aproveche de forma adecuada un producto.

El cacao, es un producto que abunda dentro del territorio nacional y es reconocido principalmente para hacer chocolate. Sus semillas, son la fuente de muchos productos de hoy en día. Lástima, que no se pueda decir lo mismo de su cáscara, pues se llegan a desperdiciar grandes toneladas al año de esta materia prima. Y es en este punto, donde la ingeniería de los materiales debe aprovechar este recurso para poder ser utilizado en aplicaciones de la vida cotidiana.

Llegados a este punto, se hace necesario hacer uso de diferentes metodologías que permitan obtener resultados satisfactorios o que simplemente sean el paso para nuevas investigaciones relacionadas al aprovechamiento de estos. Con el propósito de determinar si de alguna manera

se puede aprovechar esta materia prima, el presente trabajo final de maestría tiene como objetivo analizar los productos de cacao generados durante los procesos de producción como sustituto de materiales empleados en la ingeniería.

Para ello, el autor propone dividir el proyecto en diferentes paquetes de trabajo y enfocarlo básicamente desde la preparación inicial de las muestras hasta el resultado final. Es decir, para ello se tendrá que explorar la mejor forma de secar el producto para poder reducir los porcentajes de humedad, la mejor forma de preparar la muestra, de conocer la mejor forma de hacer las probetas, de definir una cantidad, que ensayos mecánicos van a ser los indicados para poder llegar a una buena conclusión, entre otras.

En sí, el resultado final de todo este experimento será conocer si con los sub-productos generados por el cacao, se puede sacar provecho y poderlo implementar en un proceso a gran escala para poder contribuirle con un granito a de arena a todo lo aportando por la madre tierra.

2. Justificación

Los recursos provenientes de la tierra abundan dentro del territorio nacional y son aprovechados para el beneficio de la población en general. Colombia, es un país reconocido por la producción de cacao ocupando el puesto 10 a nivel mundial superado por países como Ecuador, Brasil, Nigeria y Camerún solo por nombrar algunos. Durante el año 2019 se produjeron 59.740 toneladas, donde se evidenció un aumento en las exportaciones y una disminución en las importaciones brindando así mismo un aporte del 8.1 % al PIB en el primer trimestre del 2020 según la Federación Nacional de Cacaoteros. Pero, a pesar de ser un gran productor, el desperdicio generado durante la extracción de la semilla sigue siendo un “problema” en términos de un mal uso de los subproductos generados. Solo el 33% del “*Theobroma cacao*” es aprovechado para producir productos alimenticios, farmacéuticos o cosméticos. El 67% es correspondiente a la cáscara de cacao que, al no ser tratada debidamente, puede generar hongos, siendo foco de propagación que afecta a los cultivos y al sector. Dando como resultado residuos que pueden oscilar entre las 4715 – 5480 toneladas.

Es por ello, que este trabajo se enfocó en la manera de aprovechar adecuadamente los subproductos de cacao generados, haciendo uso de la ingeniería de materiales la cual permita analizar si estos subproductos pueden ser aplicables al sector industrial y se asemejan a las propiedades mecánicas de un determinado material.

3. Antecedentes

La humanidad aproximadamente desde hace 3000 a.C comenzó a experimentar con diferentes materiales que le brindada la naturaleza. En un principio, se utilizaba la piedra como parte fundamental para las actividades de caza (acontecimiento conocido como la edad de piedra). Y, posterior a ello, tras el descubrimiento del cobre, se dejó de lado el uso de la piedra como material favorito y se fue reemplazando con el cobre debido a su fácil maleabilidad, además de darle paso a los primeros orígenes de la metalurgia. Así mismo, con el pasar de los años, se fue reemplazando por el bronce, (aleación de estaño – cobre) dando como resultado las aleaciones [1]. Básicamente, con el pasar de los años, debido a las necesidades que se ha venido presentando ya sea por la escasez de minerales, o simplemente por el deseo de obtener mejores propiedades mecánicas de algunos materiales. El hombre, ha venido desempeñando un papel investigativo para aprovechar mejor los recursos y por ende preservar los recursos naturales [2].

Hoy en día, se puede decir que los materiales, se clasifican de forma general en: Metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos (Figura 1). Claramente, de estos se desprenden una gran cantidad de materiales debido al cambio en su estructura, propiedades físicas, mecánicas, químicas y aplicabilidad en la industria solo por nombrar algunos [3]. Sin embargo, la reutilización y el aprovechamiento de algunos materiales o compuestos naturales durante la última década ha sido fundamental, para darle paso a nuevas investigaciones encaminadas hacia la obtención de nuevos materiales a bajos costes de producción [4].

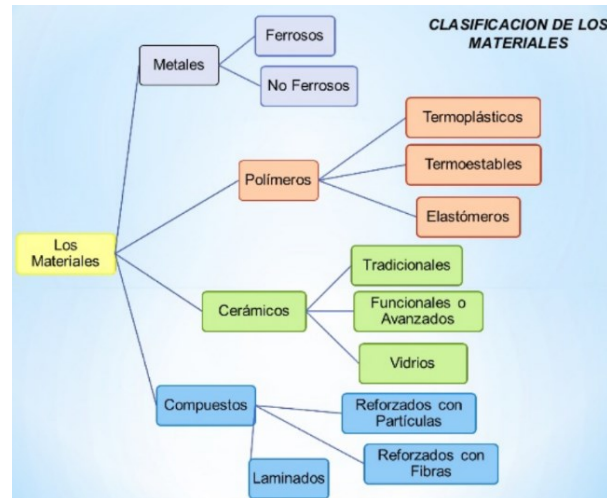


Figura 1. Clasificación de los materiales. Tomado de [3]

Llegados a este punto, se ha empezado a centralizar las nuevas investigaciones en el aprovechamiento de residuos agroindustriales. De acuerdo a los estudios realizados, solo el 17 % de los residuos no se ha aprovechado efectivamente y en su mayor parte son simplemente desechados siendo promotor de daños ambientales que pueden llegar a ser más fuertes con el pasar de los años [5]. Subproductos como los generados por el arroz, mandarina, naranja, maíz, caña de azúcar, pueden reutilizarse para la obtención del etanol, como sustitutos del carbón, generación de nuevas fuentes de energía, alimentos para animales e inclusive papel. Ahora bien, dentro de los subproductos nombrados cabe mencionar el subproducto del cacao. Mundialmente, la producción de este producto agropecuario se encuentra en el continente africano con un 63.2 %, seguido por Asia con un 17.4% y finalmente con América Latina con un 14.1% [6]. En Colombia, el cacao, se considera un producto importante el cual le genera al país beneficios económicos. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural durante el año 2020 las áreas de producción iban a aumentar. Sin embargo, este concepto pudo haber cambiado debido a los efectos generados por la pandemia [7].

Es importante resaltar, que el cacao o “Theobroma cacao L.” hace alusión a un árbol que para crecer y dar frutos necesita de humedad y de calor, de allí la razón del porque se da en lugares tropicales (Figura 2). El fruto, conocido como mazorca, puede pesar entre unos 450 y 500 gr aproximadamente cuando está maduro. Adicional a ello, los residuos pueden ser fuentes de energía renovables favoreciendo la economía y el aprovechamiento del mismo pudiendo así mitigar los desechos del cacao (Figura 3). Pero no solamente, se puede aprovechar para esto,

sino también para la generación de productos alimenticios (como el chocolate, producto que más se aprovecha de la pulpa del cacao) cosméticos, farmacéuticos y médicos [8]. Por tal razón, se hace importante poder caracterizar la cáscara de cacao. Sin embargo, hay que tener en cuenta que dependiendo de lo que se desee encontrar, las variables de la caracterización pueden ser diferentes.



Figura 2. Theobroma de Cacao L. Tomado de [7]

Complementando lo expuesto anteriormente, sobre los usos de este, también se destaca su uso como fertilizante aplicándolo directamente sobre el suelo. Aunque, se pueden generar impactos negativos asociados a la transferencia de patógenos. Dentro de los métodos de caracterización termoquímica, se conocen la pirólisis, gasificación y combustión) que al ser aplicados llegan a presentar entre 15.395 a 16.670 kJ / kg-1. [9]

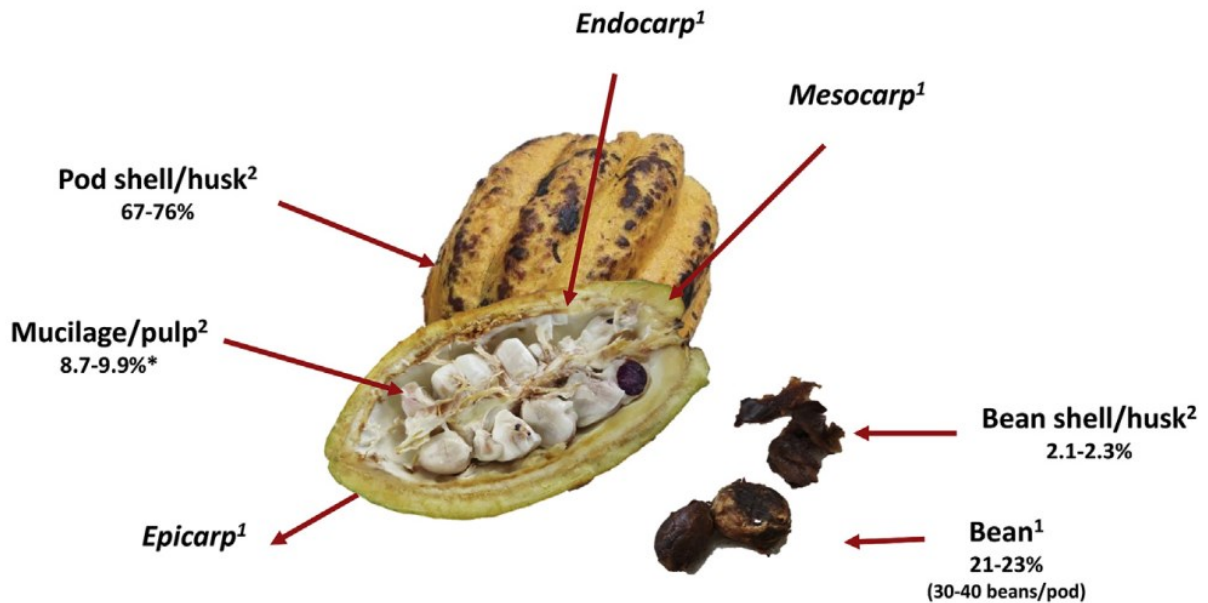


Figura 3. Estructura y desechos de la cascara de cacao. Tomado de [8]

Hasta el momento, la búsqueda se ha centralizado hacia la parte de energía renovable y caracterización del mismo. Pero, también algunos investigadores, se han enfocado en la parte del aprovechamiento de la cáscara de cacao aplicados hacia la ciencia de los materiales [10]. Dentro de su investigación, se evidencia como un aditivo a base de cacao puede mejorar las propiedades mecánicas en pellets de aserrín y carbón, donde básicamente, dependiendo del tamaño de la partícula y una serie de pruebas en laboratorio, se pueden determinar propiedades y llegar a posibles resultados del buen manejo de este [10]. Es importante recalcar, que una de las ventajas que tiene trabajar con productos agropecuarios, es que la materia prima para la creación de nuevas “cosas” abunda, pues los estudios aún siguen siendo mínimos, y hay desconocimiento de cómo manejarlos. En el caso de los subproductos de cacao no hay excepción, pues estos abundan dentro del territorio nacional de tal forma que se desperdicia aproximadamente entre 4715 – 5480 toneladas por año [11]



Figura 4. Cáscara de cacao sin secar VS seca. Tomada de [10]

Una de las maneras más económicas y sencillas para comenzar a tratar la cáscara de cacao, es mediante el secado natural, es decir al aire libre tal como se muestra en la figura 4, además de que facilita la pulverización y lo hace más frágil al momento de manipularlo. Ahora bien, existen normas como la ASTM donde se especifican una serie de parámetros a tener en cuenta para poder calcular el contenido de humedad y contenidos de ceniza en hornos solo por mencionar algunas cuyo objetivo es saber qué beneficios y que propiedades se pueden mejorar cambiando los tamaños de partícula [12]. De igual manera, se han realizado estudios sobre incorporación de la cáscara de cacao en espumas de poliuretano (Figura 5) (PU). Es decir, encaminados al grupo general de materiales compuestos, mejorando así propiedades como aumento en la absorción del agua, mayor biodegradabilidad y mayor resistencia a la deformación donde dependiendo de la concentración del desecho pueden mejorar a empeorar determinada propiedad [13].



Figura 5. Espumas con sustratos de cacao. Libre crecimiento de la raíz. Tomado de [13]

Del mismo modo, como menciona **Sarmiento (2019)**, dependiendo del objetivo se pueden plantear metodologías en forma de diagrama de flujo que facilitan la ejecución de una propuesta [14]. Básicamente, lo encontrado en la literatura, relacionado al aprovechamiento de los subproductos del cacao encaminados hacia la obtención de nuevos materiales, se ha visto incursionado como parte de un material compuesto. Es decir, aún el contenido es bajo en comparación con la matriz principal (Figura 6).

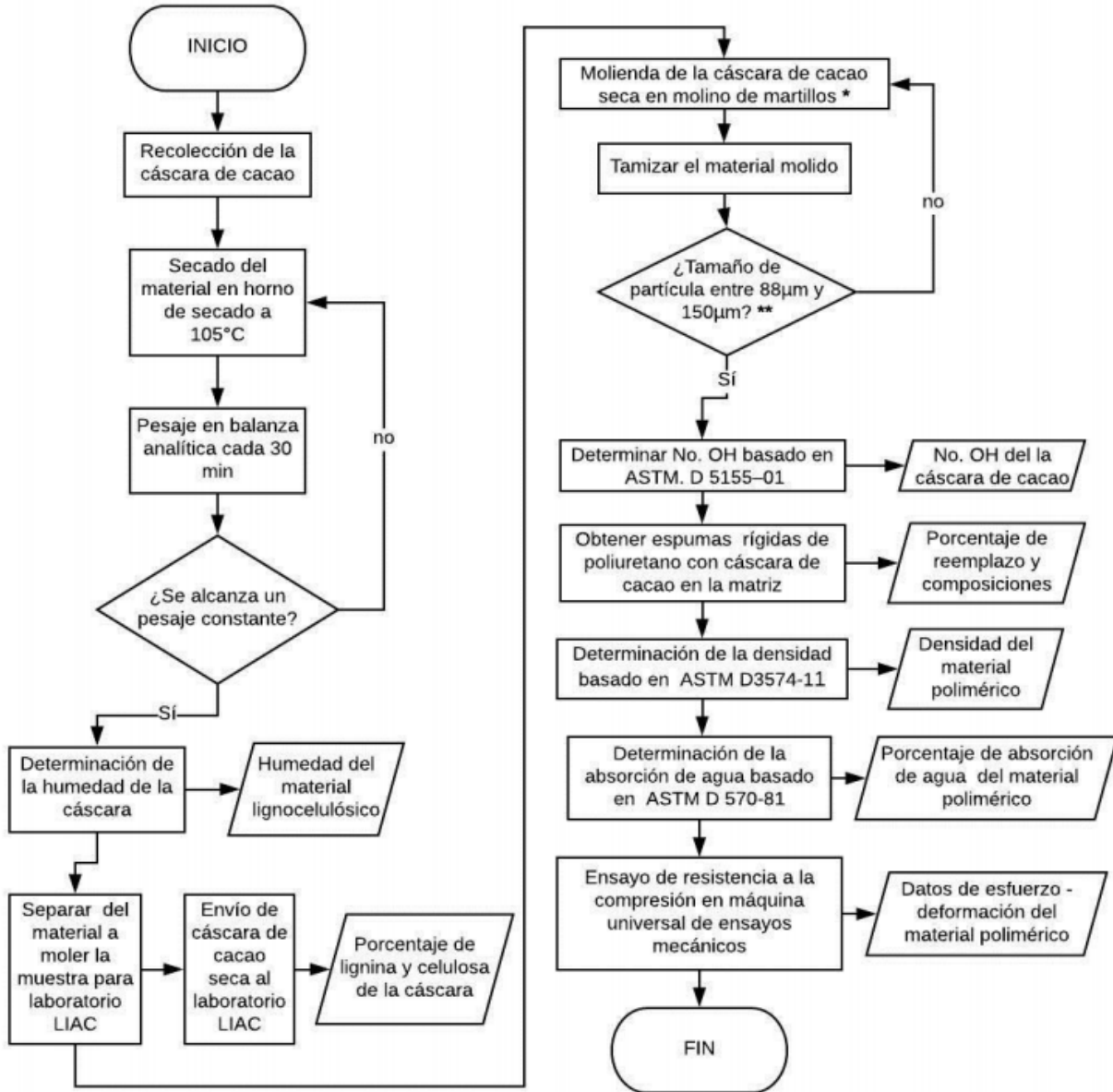


Figura 6. Diagrama de flujo. Tomado de [14]

Hecha esta salvedad, cuando se realiza un estudio de caracterización para conocer qué beneficios se pueden obtener al momento de adicionar o eliminar contenidos porcentuales de material, se debe cumplir con las normas que establecen la forma de hacer los diferentes ensayos, ya sean de compresión, tracción, impacto, torsión (Figura 7) [12]. Por lo general, dichos ensayos destructivos, se realizan en la máquina universal de ensayos independientemente del material a estudio, cuya finalidad es obtener la curva de ingeniería o el diagrama esfuerzo vs deformación (Figura 8) [15].

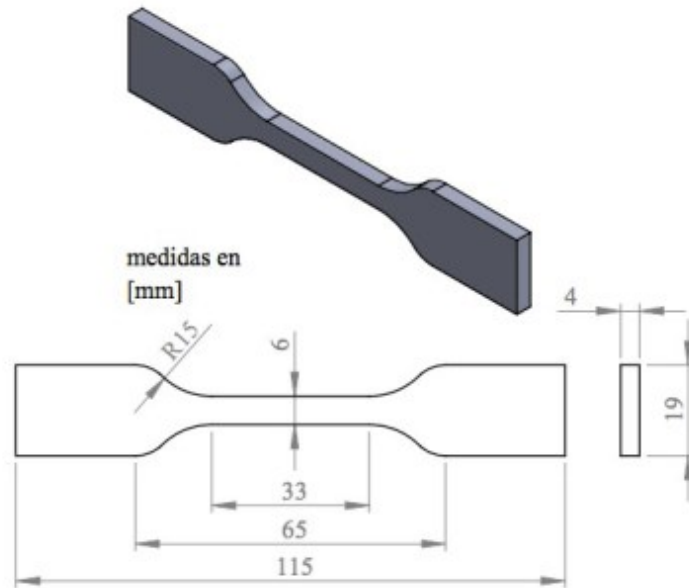


Figura 7. Probetas Para Ensayos de Tracción. ASTM D-638-14. Tomado de [15]

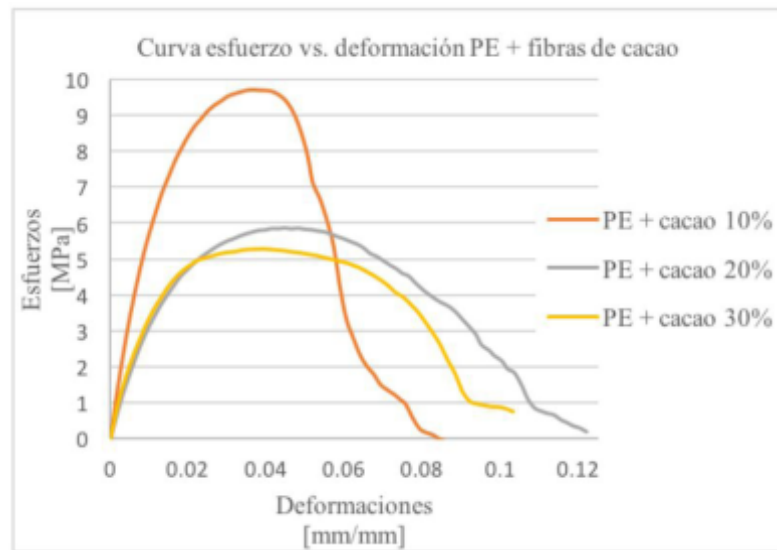


Figura 8. Diagrama Esfuerzo vs Deformación. Tomado de [15]

De acuerdo con los resultados obtenidos, al tener mayores porcentajes de subproductos de cacao, se va a ver afectado el esfuerzo último a la tensión disminuyendo en comparación al aplicar menos porcentajes. Sin embargo, la deformación, no siempre es proporcional a los esfuerzos generados [15].

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Analizar los subproductos de cacao generados durante los procesos de producción como sustituto de materiales empleados en la ingeniería.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar e identificar los tipos de pruebas destructivas para la caracterización de la cáscara de cacao.
- Comparar la caracterización obtenida de la cáscara de cacao con un material utilizado en el sector de la ingeniería.
- Identificar los posibles usos industriales de la cáscara de cacao como material base para los diferentes proyectos manufactureros

5.Desarrollo De Los Paquetes De Trabajo

En el presente capítulo, se presentará de forma detallada el desarrollo de cada uno de los paquetes de trabajo propuestos por el autor, donde se dejará en manifiesto el paso a paso de las tareas que se realizaron para darle cumplimiento y un orden lógico a cada uno de los paquetes.

5.1 Paquete de trabajo No. 1

Para determinar las propiedades mecánicas de un material, es necesario realizar una serie de ensayos previos cuya finalidad básicamente radica en conocer cómo va a ser su comportamiento bajo unas condiciones determinadas y si este se ajusta a un proceso de índole industrial. Por ejemplo, para el diseño de tanques atmosféricos o recipientes a presión, se emplea el acero debido a que presenta buenas propiedades mecánicas como una alta resistencia a la tracción, facilidades para los procesos de soldadura, resiliencia, maleabilidad y ductilidad, entre otras. Es importante resaltar que, en el mercado, existe una gran variedad de aceros que presentan diferentes propiedades debido a que dentro de su estructura molecular existe alguna adición de algún elemento de la tabla periódica en diferentes porcentajes (Cromo, Níquel, Fosforo, Zinc) [26].

Ahora bien, como se evidencio previamente en el numeral 3 en la actualidad ya no solamente se habla de materiales metálicos, poliméricos, cerámicos y compuestos. Las nuevas investigaciones, se han encaminado hacia el aprovechamiento de los residuos agroindustriales para la obtención de nuevos materiales. Y al igual que los diferentes materiales antes mencionados, también es necesario someterlos a una serie de ensayos para conocer que propiedades presentan.

5.1.1 Ensayos mecánicos realizados a los materiales

Los ensayos mecánicos, se pueden catalogar en ensayos destructivos y no destructivos. Este último no afecta la estructura y forma del material de modo que no afecta la integridad del

elemento que se esté estudiando. Por otra parte, los ensayos destructivos, si son sometidos a una serie de pruebas donde se altera la forma del material generando rotura del mismo y permiten conocer las propiedades mecánicas de un determinado espécimen. Ahora bien, debido a que se pretenden conocer las propiedades mecánicas de un material usando como fuente primaria subproductos de cacao, se enfatiza en los ensayos destructivos. A continuación, se expondrán los ensayos más comunes aplicados en el campo de la Ingeniería. [27]

- **Ensayo de Tracción:** Es uno de los ensayos más importantes, donde se coloca una probeta en una máquina universal de ensayos que consta de dos mordazas, una fija y una móvil. Donde una vez puesta en el equipo, se empieza a aplicar una carga de forma progresiva y la muestra se empieza a desplazar axialmente, hasta el punto de ruptura debido a una reducción de área tal como se muestra en la Figura 9. Estas máquinas, poseen un plotter que grafica en el eje X la deformación y en el eje Y el esfuerzo dando como resultado la famosa curva de esfuerzo VS deformación [27]



Figura 9. Máquina Universal de ensayos UH-AC [28]

Como se muestra en la Figura 10 en la curva de esfuerzo V.S deformación, se presenta una zona elástica, el límite de fluencia, una zona de deformación por endurecimiento, una tensión máxima y finalmente una ruptura súbita del material. Dicho de otra manera, con esta curva se puede determinar algunas propiedades mecánicas del material como la tenacidad, resiliencia, fragilidad, ductilidad, elasticidad y plasticidad. Todo esto, dependiendo de la forma de la curva.

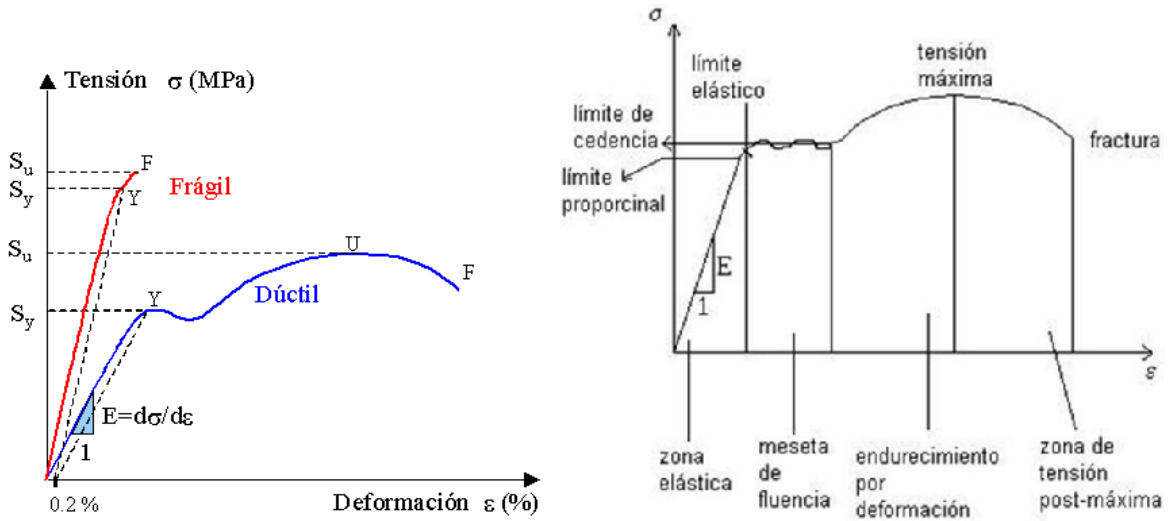


Figura 10. Diagrama esfuerzo VS deformación. Tomado de [29]

- Ensayo de Compresión:** Como lo indica su nombre, este ensayo permite determinar la resistencia que sufre un material al ser sometido a la compresión. Generalmente, se usa en materiales frágiles como el hormigón o el cemento y la resistencia es menor que en la de tracción exceptuando los mencionados previamente. De igual manera, que, en el ensayo de tracción, se usa la maquina universal de ensayos donde se puede apreciar el límite de fluencia, límite de rotura y el punto de rotura. Todo esto mostrado en la curva de esfuerzo VS deformación.



Figura 11. Ensayo de compresión. Tomado de [30]

- Ensayo de Impacto:** Este ensayo, permite conocer la energía que alcanza un material antes de romperse. La unidad de medida es expresada en Joule ($N \cdot m$). Básicamente, la probeta se ubica sobre la base del equipo, y se deja caer un péndulo con una determinada masa. Al momento del impacto, existen dos opciones y son: Que el espécimen quede partido en dos mitades, o que se doble sin haber ruptura súbita por el golpe. En el primer escenario, se puede concluir que se trata de un material frágil y en el segundo escenario de un material dúctil.

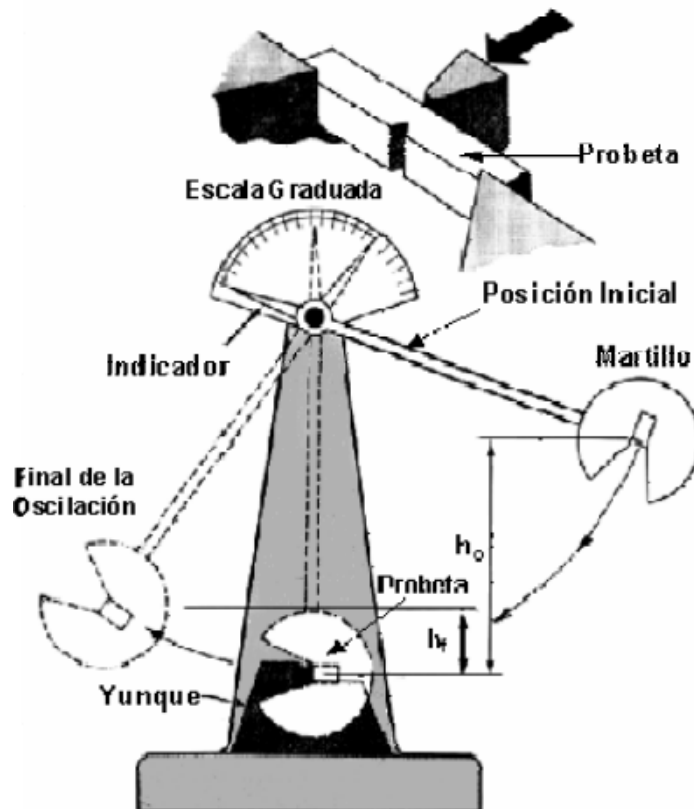


Figura 12. Máquina. Prueba de Impacto. Tomado de [27]

- Ensayo de Flexión:** Consiste en aplicar una fuerza paralela a las columnas cilíndricas de la máquina universal de ensayos sobre una probeta la cual se encuentra apoyada sobre dos soportes ubicados a determinada distancia. El desplazamiento por parte del cabezal, se realiza a velocidad constante, y una vez el punzón entra en contacto con la probeta y se empieza a deformar resultado de la fuerza generada por el equipo. Dentro de la misma zona de contacto, se presentan esfuerzos de tensión y compresión debido a la forma geométrica generada por el efecto de la carga aplicada sobre esta.



Figura 13. Ensayo de Flexión. Izquierda: Disposición equipo VS material. Derecha: Resultado final del ensayo. Tomado de [27]

- **Ensayo de Fatiga:** Este tipo de ensayo consiste en someter una probeta a un movimiento rotacional aplicando sobre esta una carga conocida. A medida que va transcurriendo el tiempo se van produciendo fisuras que se van prolongando de forma lenta, reduciendo así el área de la sección transversal hasta finalmente llegar al punto de rotura. Este ensayo es útil cuando se requiere conocer la vida útil del material cuando ésta presenta cargas cíclicas.

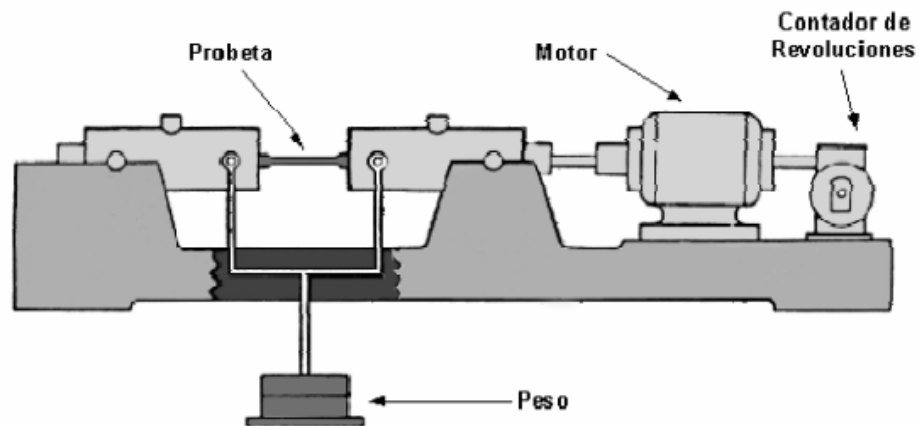


Figura 14. Montaje de un ensayo de fatiga. Tomado de [27]

- **Ensayo de Torsión:** Consiste en aplicar un par torsor a una probeta aplicando una fuerza controlada para posteriormente medir el ángulo resultante una vez finalizada la carga. Generalmente, se aplica para elementos de máquinas que están sometidos a torsión como por ejemplo ejes de motores, cigüeñales, tornillos o herramientas. Por otra parte, se deben fabricar con una sección transversal. El montaje experimental, se presenta en la Figura 15.

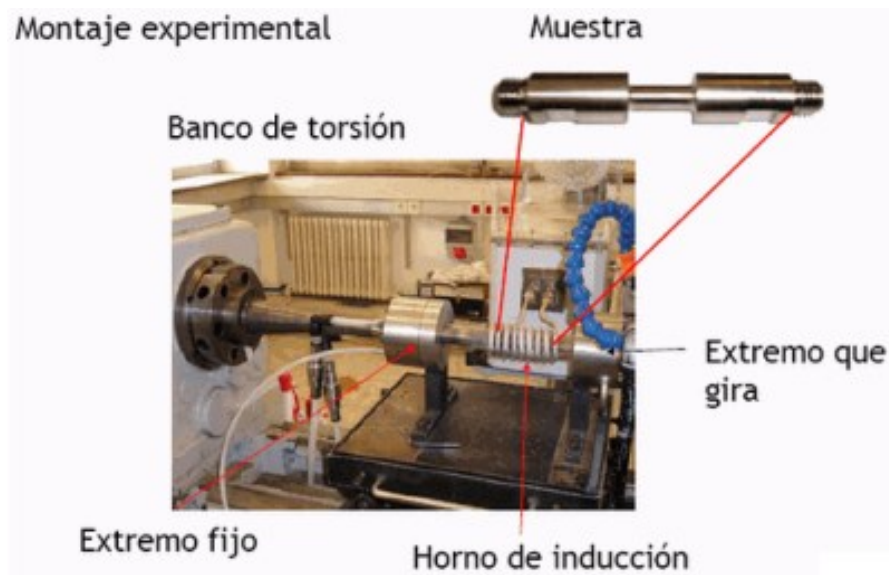


Figura 15. Montaje de un ensayo de torsión. Tomado de [27]

5.1.2 Ensayos Seleccionados y Cantidad de muestras a estudio

Llegado a este punto, de acuerdo con lo encontrado en la literatura, existen varios ensayos destructivos que se pueden aplicar a un determinado material. Sin embargo, no siempre es necesario realizarlos todos pues depende del alcance de lo que el investigador quiera determinar. Hecha esta salvedad, para determinar las propiedades mecánicas de los subproductos del cacao como fuente primaria para la obtención de nuevos materiales, se realizaron los siguientes ensayos destructivos. Se excluyen de la lista el ensayo de torsión y el de fatiga.

- Ensayo de Tracción
- Ensayo de Compresión
- Ensayo de Flexión
- Ensayo de Impacto

Una vez establecidos los ensayos a realizar, se identificó la normativa a emplear para cada uno de los ensayos. A continuación, se relacionan las normas con su respectiva forma geométrica

para la fabricación de los respectivos moldes. **Nota:** La normativa se selecciona teniendo en cuenta que las probetas van a tener una resistencia menor a 5 kN.

- **Ensayo de Tracción:** Norma ASTM D638 (Tipo I) [31]

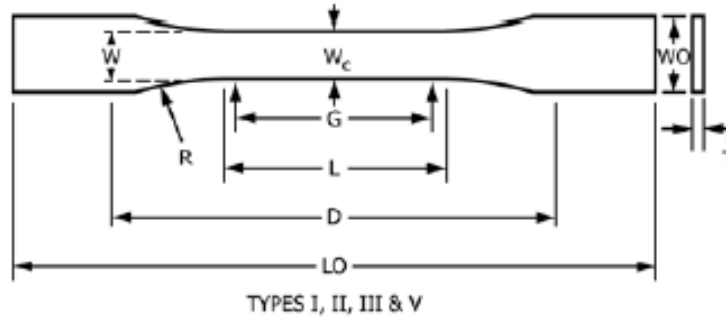


Figura 16. Dimensiones probeta de Tensión. Tomada de [31]

Dónde: Lo: 165mm, D: 115mm, L: 57mm, G: 50mm, W: 13 mm, Wo: 19mm, T: 4 mm

- **Ensayo de Compresión:** Norma ASTM D695 [32]

Probetas con geometría cilíndrica de diámetro 12.7mm y altura de 50.8mm

- **Ensayo de Flexión:** Norma ASTM D790 [33]

Probetas rectangulares de 100 mm de largo, 15 mm de ancho y 3.75mm de espesor

- **Ensayo de Impacto:** Norma ASTM D4812 [34]

Prueba Izod sin entalla 64mm x 12.7mm x 3.2mm

Para el presente estudio, se realizaron nueve (9) probetas para cada tipo de ensayo. Para un total de 36. Sin embargo, dentro de este total se realizarán grupos de tres (3) probetas con porcentajes volumétricos de cáscara de cacao al 50%, 70% y 90%. El porcentaje volumétrico restante fue compensado con acetato de polivinilo (Colbón –MR-60) el cual se comportó como un aglutinante.

Cabe mencionar, que el cólbon es un nombre comercial y es como se conoce generalmente en el mercado. Una de las ventajas, es que este polímero sintético viscoso $(C_4H_6O_2)_n$ además de ser un termoplástico (Indicado para el objetivo del proyecto debido a que este se endurece cuando se enfría una vez sometido a una elevada temperatura) es un buen adhesivo bastante usado en la industria de la madera. Ahora bien, existen tres tipos de aglomerantes: Estos se clasifican en aéreos, hidráulicos e hidrocarbonados caracterizados debido a que se endurecen dependiendo del contacto que tenga con el ambiente; como son el aire o el agua. En el caso del acetato de polivinilo, este se encuentra dentro del grupo de los aglomerantes aéreos.

Dicho lo anterior, se hace evidente que el mejor aliado para la fabricación de las probetas teniendo como fuente primaria la cáscara de cacao es el acetato de polivinilo, no solo por los beneficios que presenta en sus propiedades fisicoquímicas si no económicas desde un punto de vista Industrial. Ahora bien, es importante resaltar, que existe una gran variedad de aglutinantes en el sector. Sin embargo, la selección final, se basó teniendo como variables: la humedad, tiempo de secado rápidos, buena adherencia con la cascará de cacao cuando este presenta porcentajes de humedad no superiores a un 18% y una alta viscosidad debido a la facilidad en la fabricación de las probetas.

Finalmente, y teniendo en cuenta la literatura encontrada y las variables que se desean tener en el agente aglutinante, se seleccionó el pegamento sintético a base de acetato de polivinilo, conocido en el mercado como colbón MR-60. De igual manera, y dado que se las propiedades mecánicas no solo dependen del tipo de aglutinante, si no de la orientación de las tirillas y/o tamaño de partícula dentro de la probeta, estas se podrían catalogar básicamente en:

- **Aglomerado de fibras Orientadas:** Virutas grandes orientadas en dirección transversal.
- **Aglomerado decorativo:** Fabricación en madera laminada seleccionada previamente.
- **Aglomerado de tres capas:** Formada en partículas grandes dispuestas entre dos capas. Se caracteriza por tener un acabado suave y facilidad en el momento del pintado.
- **Aglomerado de una capa:** Se caracteriza por presentar tamaños de partícula relativamente uniforme. Visualmente presenta un acabado superficial basto.

5.1.3 Pre-alistamiento de la cáscara de cacao

Como se revisó previamente, el desperdicio generado por la extracción de los granos de cacao es elevado, y la cáscara no se aprovecha del todo para otros procesos industriales. Sin embargo, esto ha dado apertura para que nuevos proyectos de investigación den paso a nuevas ideas para aprovechar esta valiosa materia prima. La cáscara de cacao con la que se va a trabajar proviene de una finca ubicada en el departamento del Meta, Villavicencio y fue suministrado por la Señorita Lina Giraldo. De acuerdo con la información suministrada por el proveedor se trata de un CLON FEAR 5 el cual presentan “Menos *contenido de cáscara* y *mayor contenido de granos en relación con el peso total*” [35].



Figura 17. Materia prima. Cáscara de Cacao. Elaboración propia

A continuación, se describirá el paso a paso desde la etapa de Inicio hasta la etapa final de la fabricación de las probetas en su parte experimental.

- Una vez obtenido el material, se realizó una limpieza general a la cáscara, debido a que algunas contaban con algunos hongos. Indicio de que el proceso tocaba hacerlo lo más pronto posible.
- Se realizaron cortes, para obtener tirillas de la cascara de cacao. Sin embargo, el proceso era demorado y no siempre eran uniformes. En el ensayo preliminar, de los

11.85 gramos cortados, el 80% de estas se secaron y tomaron una forma curva. Lo cual imposibilitó la fabricación de las probetas. Adicional, a que se formaron hongos por la presencia de humedad.



Figura 18. (a) Proceso de corte, (b) tirillas de Cacao, (c) Presencia de hongos y (d) Fabricación de la probeta. Elaboración propia

- Como se muestra en la Figura 18 (d), al colocar las tirillas a lo largo de la probeta, la disposición de estas se hacía compleja puesto que estas sobresalían de la muestra. Y la relación de volumen entre la cáscara de cacao y el aglutinante era difícil de cuantificar. Adicional a ello, se concluyó que la resina epoxica no era un buen aglutinante (para este caso) por su largo tiempo de secado, su elevado costo, su manipulación y preparación. Además de su apariencia física.
- Con base al primer ensayo, se concluyó que no era la mejor opción por el procedimiento tan complejo que este conllevaba, adicional a que no parecía un

material compuesto con sus componentes homogéneos. Al contrario, daba la sensación de que la cáscara se encontraba encapsulada en un tipo de resina, lo cual no era el objetivo del proyecto. Sin mencionar, que la presencia de porcentajes altos de humedad generó microorganismos y claramente un deterioro acelerado del material, si se hubiera decidido realizarlo de esa manera.

Ahora bien, dado que era necesario reducir los porcentajes de humedad y facilitar la fabricación de las diferentes muestras, se usó el mismo principio de los aglomerados de madera. Donde los porcentajes de humedad oscilan entre un 6% y 17% y la fabricación se hacen con partículas más finas. Es decir, aserrín. [36]

- Dicho lo anterior, debido a que las cáscaras de cacao tenían una humedad inicial del 81.5% y se deseaba reducir a porcentajes que estuvieran por debajo de un 17% estas se sometieron a un secado natural, es decir al aire libre. Esto, básicamente por temas de costos operacionales puesto que a nivel industrial es más económico aprovechar la radiación del sol que en un horno de convección forzada. [10]
- El resultado de este proceso de secado, durante el periodo mostrado en la tabla 1 resultó en una humedad final del 14.17 %. Dando así un resultado satisfactorio ya que se encontraba dentro del rango según la literatura encontrada. Estos ensayos, se realizaron en el laboratorio de Pos-cosecha de granos de Ingeniería Agrícola de la facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá

Tabla 1. Porcentajes de humedad. Elaboración propia

Día	Humedad Inicial	Día	Humedad Final
0	81,50%	7	14,17%

- Para la verificación del contenido de humedad, se empleó un analizador de humedad electrónico MA 150. Referencia SARTORIUS.

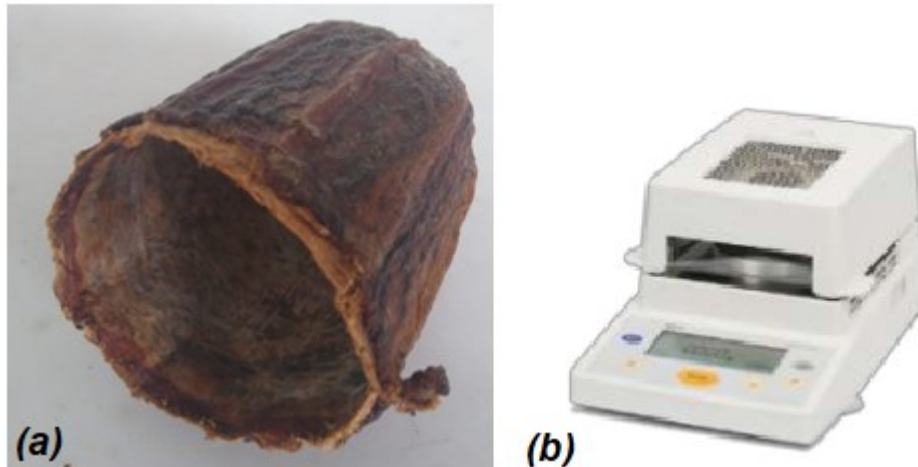


Figura 19. (a) Resultado Final. Secado natural y (b) Medidor de contenido de humedad. Elaboración propia.

- Una vez verificado el contenido de humedad, el siguiente paso fue disponer toda esa materia prima en un molino triturador forrajero – Súper TRF 400. Para ello, se empleó un tamiz semi circular en acero inoxidable con agujeros entre \varnothing 2.3 mm y \varnothing 2.4 mm y una separación entre ellos de 5 mm aproximadamente. (Figura 20)

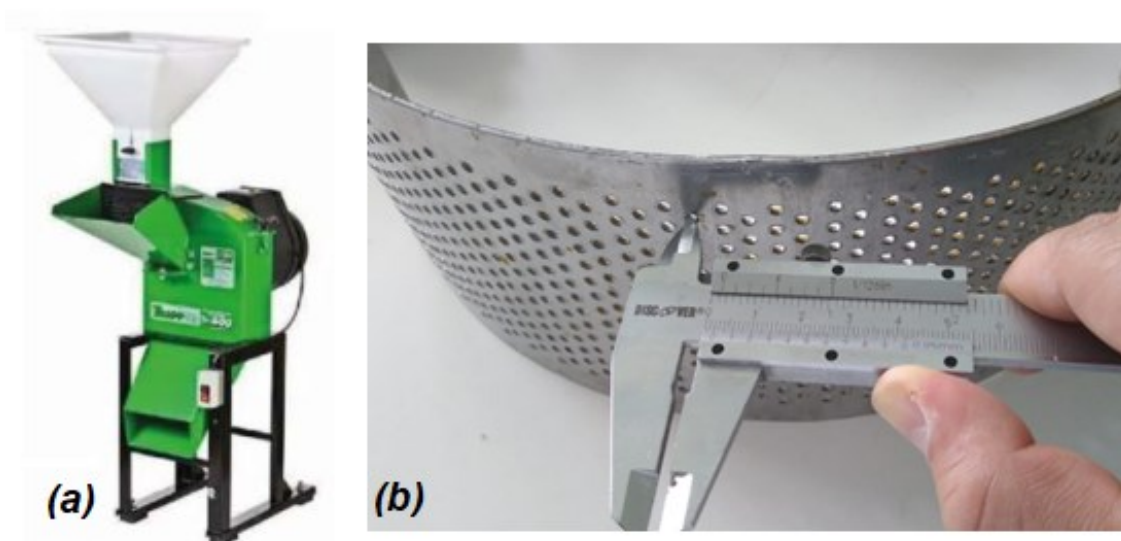


Figura 20. (a) Molino triturador, (b) Medición agujeros del Tamiz. Elaboración propia

- Como se evidencia en la Figura 21 (a) con porcentajes de humedad del 14.17 % la cáscara se asemeja mucho al aserrín en su forma física y es más fácil de manipular, además de que la presencia de microorganismos desaparece. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 21 (b) si se trabaja con porcentajes altos de humedad, al momento de la trituración el resultado final queda en una masa mojada y difícil de manipular, adicional a que es evidente la presencia de microorganismos en estos casos.

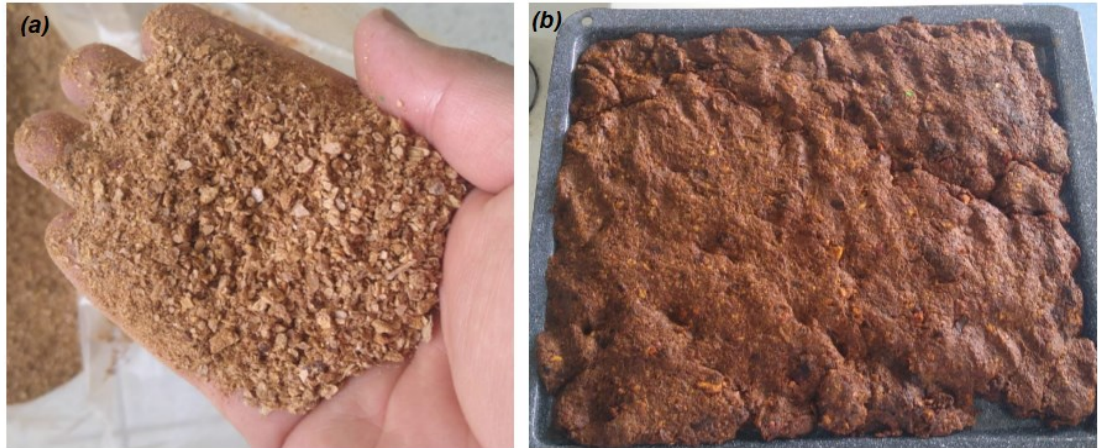


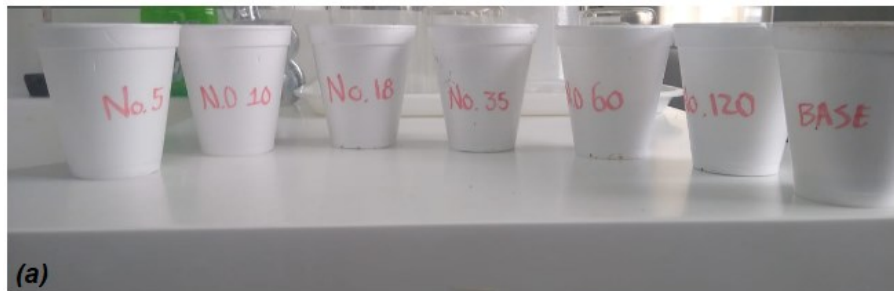
Figura 21. Resultado de la trituración (a) Seco, (b) Húmedo

- Del proceso de trituración, se obtuvo una masa final de 927,77 gramos de la cáscara en relación con el peso inicial de la cáscara entera. Los desperdicios generados no superaron el 10% ya que estaba seca. En este punto, es importante recalcar, que cuando se realizó la prueba con la cáscara húmeda ésta se pegó en las paredes del equipo y el desprendimiento de material fue muy complejo, al igual que se perdió mucha materia prima aproximadamente en un 42%
- El paso siguiente, consistió en determinar la densidad del producto final. Y tamizar las partículas generadas del resultado de la trituración. Para ello, se empleó una Tamizadora electrónica. Ref. CL 313F de 1/3 hp. Este equipo, cuenta con siete (7) recipientes de diferentes números de Tamiz exceptuando el de la parte inferior o fondo. Importante, resaltar los siguientes aspectos.
 - Los tamices son estándar según la norma ASTM E-11 [37]

- Se realizaron 5 pesajes en total. El equipo, se programó para que el movimiento vibratorio fuera de 30 segundos. Para el pesaje se utilizó una balanza electrónica de marca OHAUS.

Tabla 2. Peso resultado del proceso de Tamizaje (Unidad en gramos)

TAMIZ (No)	Apertura en Pulgadas	PESAJE 1	PESAJE 2	PESAJE 3	PESAJE 4	PESAJE 5
5	0,157	2,42	3,52	3,65	3,12	3,31
10	0,787	26,85	47,29	70,83	55,51	70,45
18	0,394	42,73	61,75	59,08	61,24	60,5
35	0,197	31,3	45,91	39,83	41,1	42,25
60	0,098	13,49	19,82	16,01	17,32	16,67
120	0,049	7,97	11,05	10,07	9,79	10,46
SIN NADA (BASE)	-	2,93	4,95	4,57	4,92	5,11
TOTAL	-	127,69	194,29	204,04	193	208,75



(a)



(b)



(c)

Figura 22. (a) Disposición de material en Icopor, (b) Tamizadora electrónica, (c) Pesaje 1 del material. Elaboración propia

- Una vez tamizadas y separadas las partículas de cacao, se halló la densidad de cada uno de los tamices. Para ello, se utilizó una probeta de 50 ml y se llenó hasta los 50 ml. La base de la probeta se golpeó tres veces sobre la mesa de trabajo para que las partículas llenaran esos puntos intersticiales y fuera más confiable el ensayo. Cabe resaltar, que la probeta tiene una masa de 20,8 gramos vacía. Dato necesario para hacer los respectivos cálculos.

$$\rho = \frac{\text{masa (Gramos)}}{\text{Volumen (Cm}^3\text{)}} \quad \text{(Ecuación1)}$$



Figura 23. (a) Probeta con partículas de cacao, (b) Pesaje en balanza electrónica. Elaboración propia

Tabla 3. Densidades de cada Tamizaje

TAMIZ (No)	Densidad ($\frac{gr}{cm^3}$)
5	NO APLICA
10	0,364
18	0,34
35	0,322
60	0,308
120	0,306
SIN NADA (BASE)	NO APLICA
SIN TAMIZAR	0,368

- Como se muestra en la tabla 3. Las densidades fueron muy similares entre sí. En el caso del Tamiz 5 y la base, no se realizó el cálculo, debido a que la cantidad de masa fue muy pequeña en comparación con las demás.
- Recordando la ecuación 1 entre más masa por unidad de volumen, mayor será la densidad y se supone una menor porosidad. Algo deseable cuando se trata de materiales [39]. Es decir, entre más compactos estén los granos mejores propiedades mecánicas se va a obtener. Por ejemplo, la morfología de los aceros se comporta de esta manera con granulometrías irregulares independientemente de la presencia de ferrita, martensita o austenita [40]

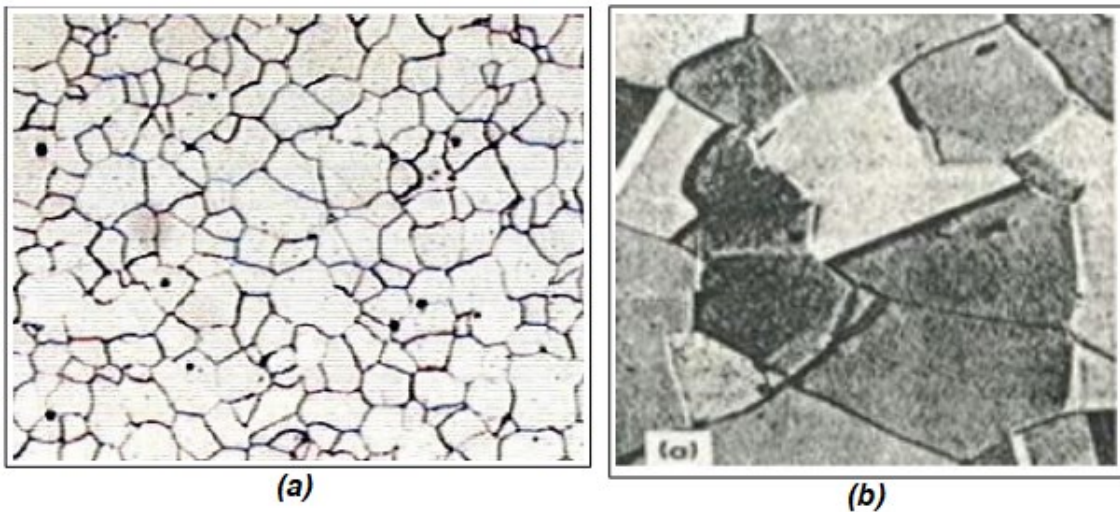


Figura 24. (a) Micrografía de ferrita, (b) Micrografía de austenita. Tomado de [40]

- De acuerdo con la literatura y al análisis experimental realizado con el tamizaje de las partículas de cacao, las probetas fueron diseñadas teniendo en cuenta una densidad de $0.368 \frac{kg}{cm^3}$. Es decir, que, si se proyecta a hacer materiales a gran escala, no se hace necesario tamizar la materia prima. Simplemente basta con triturar.

5.1.4 Fabricación de las probetas

Para la fabricación de las probetas, y la realización de los cálculos, se empleó una densidad de $0.368 \frac{kg}{cm^3}$ de acuerdo con lo mencionado en el numeral 6.1.3. Para la fabricación de los

moldes, se tuvo en cuenta las dimensiones establecidas en cada una de las normas ya descritas en el presente documento. A continuación, se describe la metodología para la fabricación de las diferentes probetas. Para las probetas de tracción, flexión e impacto, se realizó el mismo plan de trabajo.

- Para las probetas de tensión se contempló un pedazo de madera de forma rectangular con dimensiones de 500 mm x 200 mm x 4 mm. Para las probetas de flexión 370 mm x 150 mm x 3.2 mm y para las probetas de impacto 220 mm x 100 mm x 3.2 mm.
- Sobre cada uno de los pedazos de madera, se realizó el croquis de cada una de las probetas. Este, se realizó en el software SolidWorks (Programa licenciado en la compañía donde labora el autor) y posteriormente se cortó con ayuda de una cortadora laser para madera.

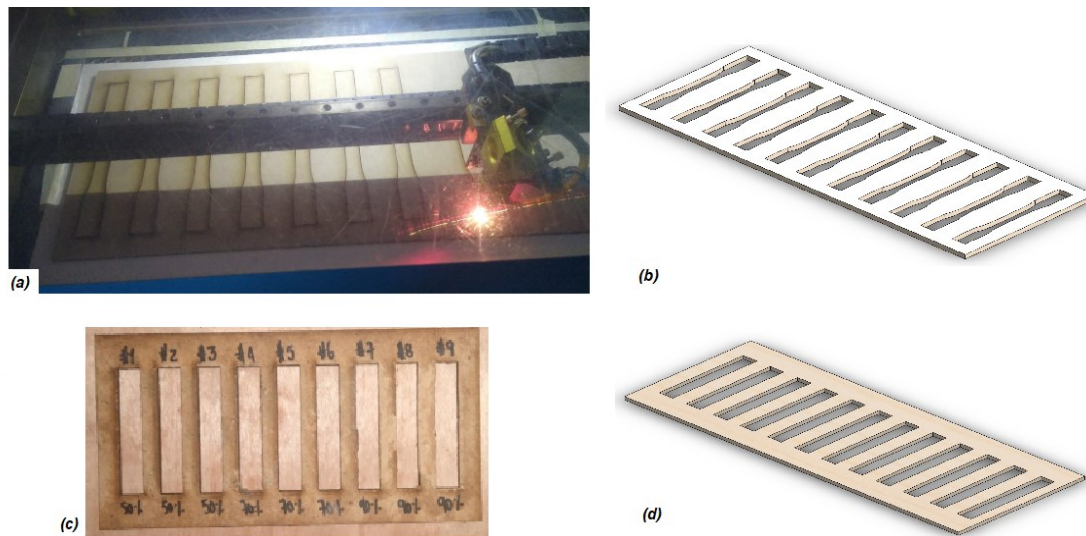


Figura 25. (a) Corte Láser, (b) Molde de tracción, (c) Molde de Impacto, (d) Molde de flexión. Elaboración propia

- Una vez hechos los moldes, y conociendo las dimensiones de la probeta y la densidad de la cáscara de cacao. Se determinó los gramos que se requerían para cumplir con los porcentajes del 50% - 70% - 90% de cacao en cada una de las probetas. Como se mencionó previamente, el aglutinante que se selecciono fue el acetato de polivinilo (Colbón –MR-60) de CARPINCOL por

su alta exigencia, rápido tiempo de secado, y por tener un buen desempeño en materiales con contenido de humedad hasta de un 15%. El cual presentó una densidad de $1.27 \frac{gr}{cm^3}$

- En las tablas 4 a 7, se relacionan las proporciones de masa de cada uno de los componentes que hicieron parte de la probeta, teniendo en cuenta, el volumen que debe ocupar cada elemento dentro de esta. Es importante resaltar, que en el cálculo se contempló un 10% adicional al volumen, esto debido a la presión que se ejercía sobre el molde y así poder cumplir con las dimensiones según la normativa de la ASTM.

Tabla 4. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de tensión. Elaboración propia

PROBETAS DE TENSIÓN. VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN $13,33 \text{ cm}^3$					
	Pocentaje	Volumen Cacao (cm3)	Masa Cacao (gramos)	Volumen Colbón (cm3)	Masa de Colbón (gramos)
Probeta 1	50%	7,17	2,64	7,17	9,10
Probeta 2					
Probeta 3					
Probeta 4	70%	10,03	3,69	4,30	5,46
Probeta 5					
Probeta 6					
Probeta 7	90%	12,90	4,75	1,43	1,82
Probeta 8					
Probeta 9					

Tabla 5. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de flexión. Elaboración propia

PROBETAS DE FLEXIÓN. VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN $7,5 \text{ cm}^3$					
	Pocentaje	Volumen Cacao (cm3)	Masa Cacao (gramos)	Volumen Colbón (cm3)	Masa de Colbón (gramos)
Probeta 1	50%	4,25	1,56	4,25	5,40
Probeta 2					
Probeta 3					
Probeta 4	70%	5,95	2,19	2,55	3,24
Probeta 5					
Probeta 6					
Probeta 7	90%	7,65	2,82	0,85	1,08
Probeta 8					
Probeta 9					

Tabla 6. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de impacto. Elaboración propia

PROBETAS DE IMPACTO. VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN 2,6 cm^3					
	Pocentaje	Volumen Cacao (cm3)	Masa Cacao (gramos)	Volumen Colbón (cm3)	Masa de Colbón (gramos)
Probeta 1	50%	1,30	0,48	1,30	1,65
Probeta 2					
Probeta 3					
Probeta 4	70%	1,82	0,67	0,78	0,99
Probeta 5					
Probeta 6					
Probeta 7	90%	2,34	0,86	0,26	0,33
Probeta 8					
Probeta 9					

Tabla 7. Análisis volumétrico y de masa. Probetas de compresión. Elaboración propia

PROBETAS DE COMPRESIÓN. VOLUMEN DEL ESPÉCIMEN 6,44 cm^3					
	Pocentaje	Volumen Cacao (cm3)	Masa Cacao (gramos)	Volumen Colbón (cm3)	Masa de Colbón (gramos)
Probeta 1	50%	3,85	1,42	3,85	4,89
Probeta 2					
Probeta 3					
Probeta 4	70%	5,39	1,98	2,31	2,93
Probeta 5					
Probeta 6					
Probeta 7	90%	6,93	2,55	0,77	0,98
Probeta 8					
Probeta 9					

- Finalmente, una vez definidos todos los parámetros descritos hasta el momento, se procedió a la fabricación de las muestras. Inicialmente, se fue pesando las partículas de la cáscara de cacao de acuerdo con los valores presentados en las tablas 4 – 5 – 6 y 7 (a). Posterior a ello, y una vez corroborados los pesos de cada uno (cáscara – aglutinante), estos se mezclaron por 5 minutos cuidadosamente hasta lograr una mezcla homogénea (b) para posteriormente ser puesto en el molde. Esta debía ser esparcida por toda la superficie de la probeta garantizando que cubriera toda

la superficie del mismo, y con ayuda de un pedazo de madera (sobrantes del corte del molde) se iba compactando para que tomara la forma del mismo (c). En este punto cabe resaltar que se aplicó vaselina sobre la bandeja de acero inoxidable para que al momento de despegar las probetas no quedaran remanentes de esta. De igual manera, se colocaron tirillas de aluminio en la parte superior para garantizar que el desmolde de estas no presentara inconvenientes (d). Una vez puestas todas las mezclas en los moldes, sobre la bandeja se colocaron dos bloques (uno encima del otro) de 6 kg cada una cuya finalidad fue garantizar presión constante durante 1 hora (tiempo estipulado por recomendaciones del fabricante) bajo una temperatura de 150 °C (e). Dicha temperatura se seleccionó dado que estudios previos indican que, a temperaturas superiores 120°C e inferiores a 170°C la resistencia a la tracción es mayor que a temperatura ambiente. Sin embargo, después de una temperatura de 170°C se tiende a reducir el esfuerzo [41].

Una vez transcurrido el tiempo de 1 hora en el horno (horno de cocina Abba), se retiró de este y se dejó enfriar al medio ambiente hasta garantizar que estuviera frío (f). Una vez retiradas las probetas de los moldes se midieron con un calibrador pie de rey digital (propiedad del autor) para corroborar que las medidas de las probetas estuvieran acordes con la normativa ya mostrada.

Llegado a este punto, es importante resaltar que, en los procesos de manufactura, así se aplique la misma metodología para la fabricación de un producto o material siempre van a haber desviaciones dimensionales en términos milimétricos ya sea por el equipo de corte, la experiencia, temperatura e inclusive la presión.

Finalmente, una vez retiradas y verificadas las medidas, se marcaron con una cinta de enmascarar y así pasar a la siguiente fase del proyecto: Los ensayos destructivos. En la Figura 26, se ilustra el flujo detallado del proceso experimental con la respectiva nomenclatura nombrada previamente.

Adicional, en la tabla 8 se muestra la presión ejercida sobre cada una de las probetas recordando que (ecuación 2)

$$\text{Presión (MPa)} = \frac{\text{Fuerza (Newtons)}}{\text{Área (mm}^2\text{)}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

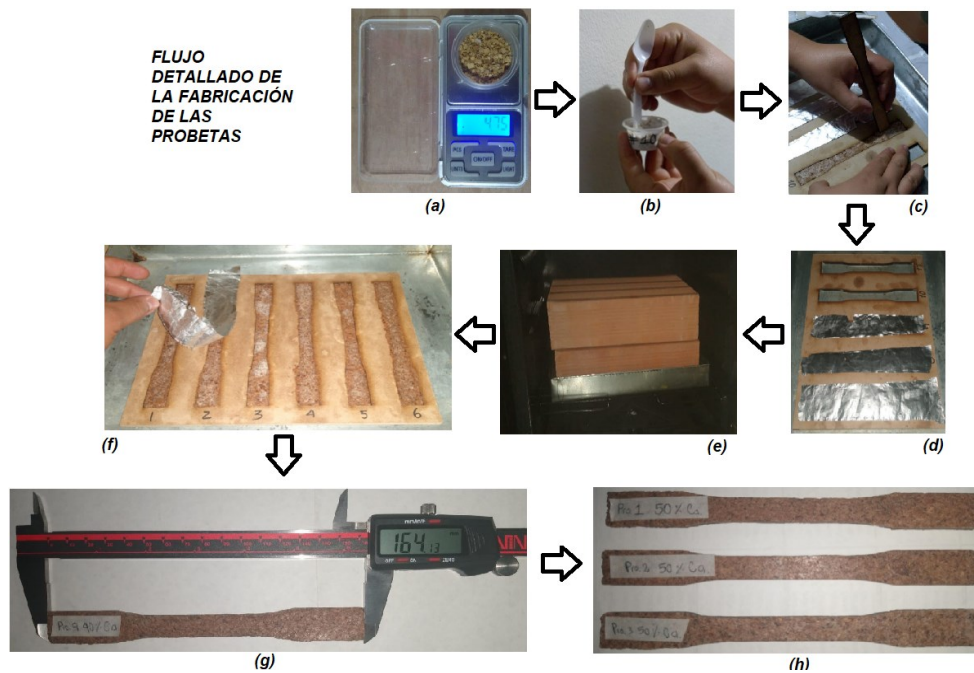


Figura 26. Flujo detallado de la elaboración de las probetas. Elaboración Propia

Tabla 8. Presiones generadas en cada probeta. Elaboración propia

	Área en (mm ²)	Fuerza (Newtons)	Presión en MPa	Presión en KPa
Tensión	2665,18	117,72	0,0442	44,17
Flexión	1500	117,72	0,0785	78,48
Impacto	812,8	117,72	0,1448	144,83
Compacto	126,68	117,72	0,9293	929,29

5.2 Paquete de trabajo No. 2

Llegados a este punto, y como se afirmó en el primer paquete de trabajo, se realizaron 9 probetas de cada ensayo (tensión, flexión, impacto y compresión) y con porcentajes de 50%, 70% y 90%.

Hecha esta salvedad, el paso siguiente, se basó en disponer todas las probetas al laboratorio de interfacultades de ensayos mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá para comenzar con la fase final de la parte experimental del proyecto. Los ensayos, se realizaron en la máquina de ensayos mecánicos de marca Shimadzu; Modelo AG-IS 5KN exceptuando el de impacto que se realizó en la máquina de impacto de marca: Physical Test Solution / Model ITC-XJU-22. (Figura 27).



Figura 27. Izquierda. Máquina de Ensayos Mecánicos. Derecha. Máquina de impacto Universidad Nacional de Colombia

Se debe considerar que:

- Para el ensayo de flexión a tres puntos se implementó un dispositivo con apoyos inferiores de diámetro 5mm, el indentador superior tiene un diámetro de 4mm y la distancia entre soportes se estableció en 40mm.
- Para el ensayo a compresión se implementó dos discos metálicos de 150mm, ubicados en forma paralela
- La resolución del péndulo utilizado de "1J" es de 0.01J
- Software de adquisición de datos: ImpactStar (Máquina de Impacto)
- Para el ensayo de impacto se adaptó el equipo en la configuración de ensayo Izod, con una altura entre la base de sujeción y el punto de impacto del péndulo de 22mm

Una vez definidos los equipos que se aplicaron en los diferentes ensayos, se dejaron todas las probetas sobre la mesa y se empezó con las de tensión, flexión, compresión y finalmente impacto. (Figura 28).



Figura 28. Probetas de Tensión (Color Azul), Flexión (Color Naranja), Impacto (Color Rojo) y Compresión (color negro). Elaboración propia

5.2.1 Ensayo de Tensión

Primeramente, se procedió a definir los parámetros iniciales dentro de la máquina de ensayos mecánicos. Para esto, fue necesario introducir algunos valores dimensionales como el espesor, el ancho, y las distancias a centros de curvatura de la probeta. (Ver Figura 16). Estas medidas, fueron tomadas con un calibrador pie de rey digital. En la Tabla 9 se presentan las medidas de cada una de las probetas. Y cómo se puede observar, todas las medidas no fueron las mismas durante cada una de las mediciones. Estas presentaron las siguientes desviaciones estándar:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

(Ecuación 3)

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

(Ecuación 4)

Tabla 9. Medidas Introducidas en el equipo. media y desviación estándar

Name:	Thickness	Width	Gauge Length
Size Unit:	mm	mm	mm
Pro1-50%Ca	4,6	12,86	69,44
Pro2-50%Ca	4,56	12,87	66,63
Pro3-50%Ca	3,95	13,09	69,21
Pro4-70%Ca	4,52	13,35	68,29
Pro5-70%Ca	4,72	13,36	66,73
Pro6-70%Ca	4,33	13,32	70,03
Pro7-90%Ca	4,76	13,37	67,45
Pro8-90%Ca	4,77	13,1	65,07
Pro9-90%Ca	4,92	13,25	66,83
Mean	4,57	13,17	67,74
Standard Deviation	0,289	0,205	1,616

**Figura 29.** (a) Probeta sin Romper, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza. Elaboración propia (Tensión)

En la tabla 10, se puede observar que la fuerza generada para romper las probetas en ninguno de los casos supero los 200 N (20.39 kg) exceptuando la probeta 7 con 90% de cáscara de cacao. Esto debido probablemente al proceso de fabricación de las probetas. En todos los casos, los resultados obtenidos variaron y se llegaron a encontrar diferencias promedio entre ellas hasta de 30 N (3.05 kg). Sin embargo, en todos los casos el máximo esfuerzo no sobrepaso los 5 MPa y las deformaciones fueron relativamente pequeñas indicando así que se trata de un material frágil. Información corroborada debido a la fractura que sufrió al momento de romperse la probeta (Figura 29).

Tabla 10. Resultados obtenidos del Equipo (tensión). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos - UNAL

Name	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter				
Units	N	mm	N/mm2	%
Pro1-50%Ca	162,281	0,708	2,74328	1,01959
Pro2-50%Ca	191,969	0,744	3,27105	1,11661
Pro3-50%Ca	133,922	0,584	2,59009	0,84381
Mean	162,724	0,67867	2,86814	0,99334
Standard Deviation	29,026	0,08394	0,35724	0,13828
Pro4-70%Ca	105,047	0,429	1,74086	0,6282
Pro5-70%Ca	167,703	0,618	2,65946	0,92612
Pro6-70%Ca	95,0781	0,44	1,6485	0,6283
Mean	122,609	0,49567	2,01627	0,72754
Standard Deviation	39,369	0,10609	0,55893	0,17198
Pro7-90%Ca	232,031	0,798	3,64593	1,1831
Pro8-90%Ca	133,734	0,56	2,1402	0,86061
Pro9-90%Ca	164,375	0,644	2,52148	0,96364
Mean	176,713	0,66733	2,7692	1,00245
Standard Deviation	50,2966	0,1207	0,78284	0,16471
Total Mean	154,016	0,61389	2,55121	0,90778
Total Standard Deviation	42,6856	0,1269	0,65269	0,19299

Por otra parte, en las Figuras 30, - 31 y - 32 se muestra claramente que el material no presentó grandes deformaciones plásticas como si pasa con los materiales dúctiles. Es decir, que, una vez sobrepasado el límite de fluencia, el material falla súbitamente y se rompe. Y debido a esto, este tipo de materiales presentan poca tenacidad (debido a que el área bajo la curva en la zona plástica es bastante pequeña), pues la capacidad de absorber energía es casi nula. Adicional, a que su cualidad es ser un material rígido.

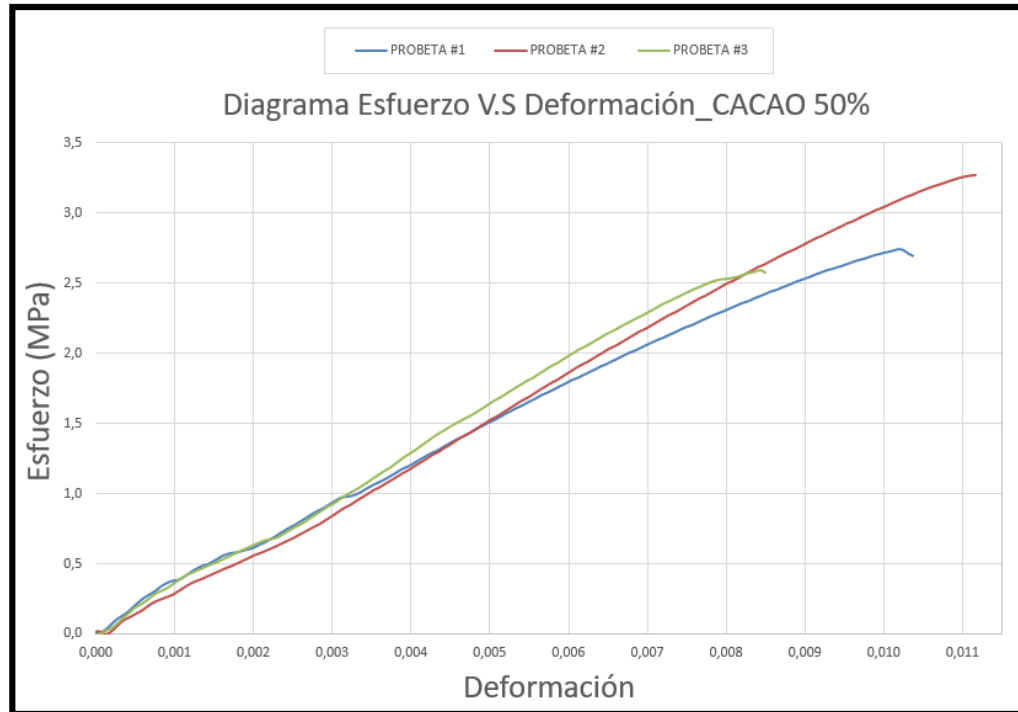


Figura 30. Diagrama Esfuerzo VS Deformación. Porcentaje de cáscara de Cacao del 50% Elaboración propia

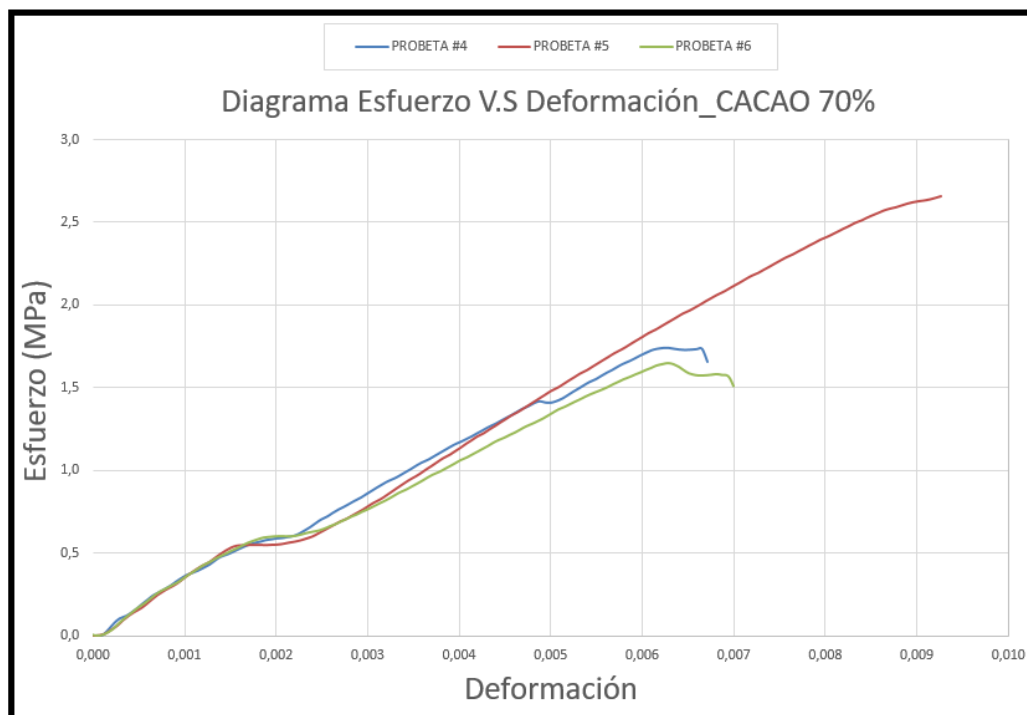


Figura 31. Diagrama Esfuerzo VS Deformación. Porcentaje de cáscara de Cacao del 70% Elaboración propia

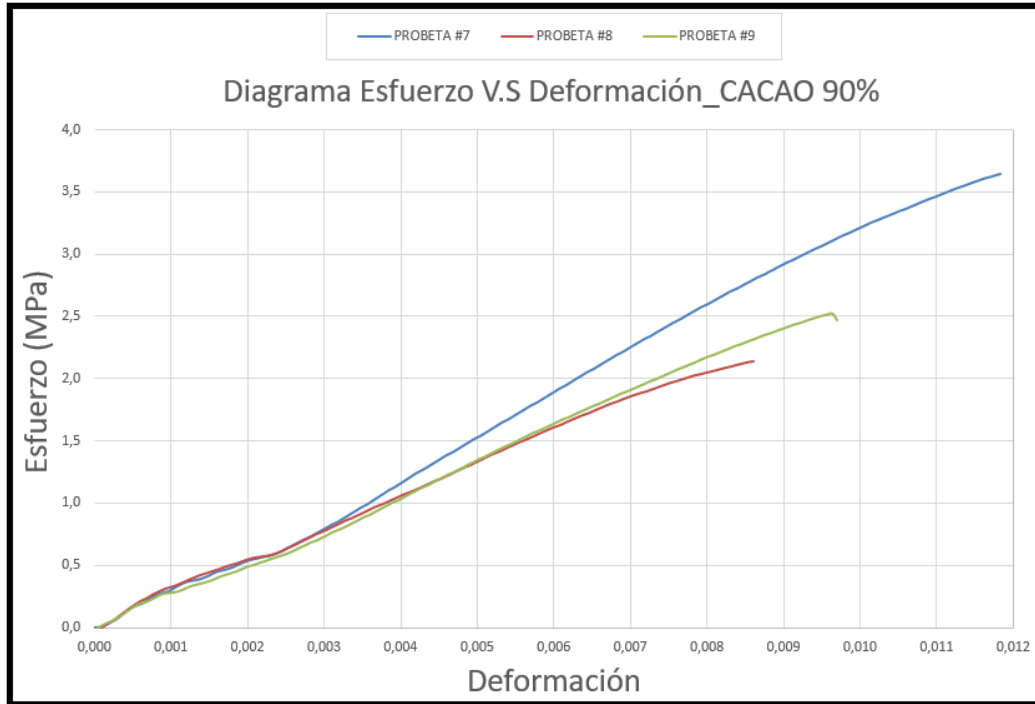


Figura 32. Diagrama Esfuerzo VS Deformación. Porcentaje de cáscara de Cacao del 90% Elaboración propia

En las tablas siguientes, se presentan las propiedades que se determinaron con base a las gráficas de esfuerzo VS deformación.

Tabla 11. Probetas con 50 % cáscara de cacao. Elaborado por el autor

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Unidades
Módulo elastico	268,307	293,948	306,952	MPa
Límite de fluencia	2,736	3,261	2,582	MPa
Resistencia a la Tensión	2,743	3,271	2,590	MPa
Punto de Rotura	2,695	3,271	2,572	MPa
Resiliencia	0,0151	0,0185	0,0114	J/mm3
Tenacidad	0,0157	0,0189	0,0117	J/mm3
Tiempo del ensayo	8,7	8,95	7,1	Segundos

Tabla 12. Probetas con 70 % cáscara de cacao. Elaborado por el autor

	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Unidades
Módulo elastico	265,087	286,974	264,935	MPa
Límite de fluencia	1,730	2,649	1,607	MPa
Resistencia a la Tensión	1,741	2,659	1,648	MPa
Punto de Rotura	1,657	2,659	1,509	MPa
Resiliencia	0,00615	0,01250	0,00497	J/mm ³
Tenacidad	0,00647	0,01266	0,00650	J/mm ³
Tiempo del ensayo	5,55	7,45	5,9	Segundos

Tabla 13. . Probetas con 90 % cáscara de cacao. Elaborado por el autor

	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Unidades
Módulo elastico	308,490	252,052	264,949	MPa
Límite de fluencia	3,635	2,134	2,515	MPa
Resistencia a la Tensión	3,646	2,140	2,521	MPa
Punto de Rotura	3,646	2,140	2,469	MPa
Resiliencia	0,02167	0,00966	0,01219	J/mm ³
Tenacidad	0,02189	0,00980	0,01249	J/mm ³
Tiempo del ensayo	9,6	6,75	7,8	Segundos

En los tres grupos, se evidencia que el tiempo del ensayo no superó los 10 segundos y la resiliencia estuvo muy cerca a la tenacidad. Las diferencias son muy pequeñas, típico de materiales frágiles, con media de 0,0127 y desviación estándar de 0,0002351. El mejor comportamiento en términos generales de propiedades mecánicas son las probetas con porcentajes de un 50% cáscara de cacao, esto debido probablemente a que el aglutinante permite que las partículas tengan una mejor adherencia entre sí.

NOTA: Es importante resaltar que, para el ensayo, se manejó una velocidad de 5 mm/min de acuerdo tal como lo define la norma ASTM D638. Tabla 1 y los cálculos, fueron realizados en la hoja de Excel entregada por el laboratorio de ensayos mecánicos. Cabe mencionar que las medidas digitalizadas son un promedio de tres mediciones realizadas sobre el cuerpo de las probetas. Este mismo principio aplica para las de tensión, compresión, flexión y compresión.

5.2.2 Ensayo de Compresión

Para este ensayo, de igual manera se contemplaron tres grupos de probetas. Cada uno con porcentajes del 50% - 70% - 90%. El procedimiento, fue similar al realizado en el ensayo de tensión. Sin embargo, en este caso, la velocidad del ensayo se hizo de 1.3 ± 0.3 mm/min. En la Figura 33, se puede observar que cuando se está aplicando la carga y esta sobrepasa el límite de fluencia por compresión se empieza a deformar plásticamente y se empieza a generar un pandeo. Generalmente, esto ocurre en materiales dúctiles, ya que en materiales frágiles este estalla de forma brusca (similar al hormigón). Esto, pudo haber sido porque las partículas, no compactaron bien al momento de la fabricación y al ser sometidas a compresión, estas se iban uniendo. Dando como resultado un material blando.

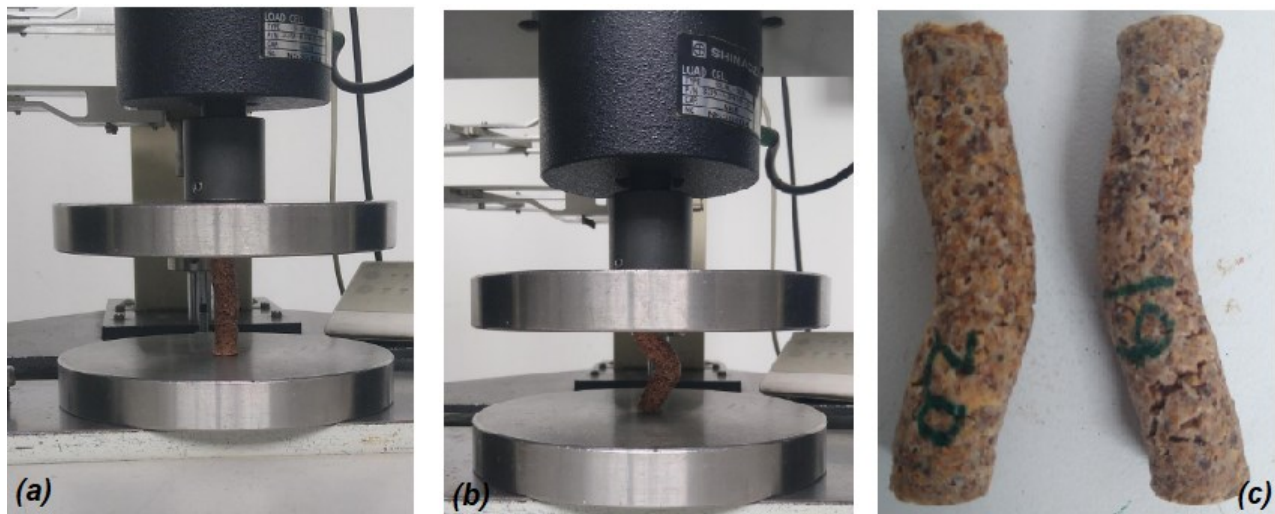


Figura 33. (a) Disposición de la probeta, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza. Elaboración propia (Compresión)

Al igual que en el ensayo de tensión, en el equipo se introdujeron las dimensiones de cada una de las probetas. Y se determinó la media y la desviación estandar. Una vez más, coincide que el proceso de fabricación juega un papel importante cuando se trata de llevar a cabo la elaboración de nuevos materiales.

Tabla 14. Medidas Introducidas en el equipo. Media y desviación estándar

Name:	Diameter	Height
Size Unit:	mm	mm
Pro1-50%Ca	10,6	50,66
Pro2-50%Ca	10,8	50,56
Pro3-50%Ca	10,78	48,19
Pro4-70%Ca	11,06	47,46
Pro5-70%Ca	11,08	48,66
Pro6-70%Ca	10,93	49,55
Pro7-90%Ca	10,88	52,43
Pro8-90%Ca	11,03	49,28
Pro9-90%Ca	10,89	50,64
Mean	10,89444	49,714
Standard Deviation	0,154281	1,5237

En la tabla 15 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de compresión, donde los esfuerzos son mayores que en el ensayo de tensión y mayores desplazamientos. Es decir, mientras que en el ensayo de las deformaciones superaron el milímetro. En compresión, estas estuvieron con promedios hasta de 10 mm. Es decir, que mientras en tensión el material tiende a ser frágil, en compresión este tiende a ser dúctil, debido en primera medida por el pandeo (esto se genera debido a la relación entre el largo de la probeta y el área de su sección transversal) generado y a las altas deformaciones (comparadas con la de tensión). En promedio antes de llegar al punto de falla, este soportó hasta una carga de 40 kg.

Tabla 15. Resultados obtenidos del Equipo (compresión). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos - UNAL

Name	Max_Force	Max_Displacement	Max_Stress	Max_Strain
Parameter				
Units	N	mm	N/mm ²	%
Pro1-50%Ca	362,5	9,1295	4,10777	18,0211
Pro2-50%Ca	351,094	8,0025	3,83253	15,8277
Pro3-50%Ca	535,469	14,726	5,86688	30,5582
Mean	416,354	10,6193	4,60239	21,469
Standard Deviation	103,314	3,60084	1,10369	7,94751
Pro4-70%Ca	425	10,7765	4,42373	22,7065
Pro5-70%Ca	421,25	13,8025	4,36889	28,3652
Pro6-70%Ca	402,656	9,001	4,29145	18,1655
Mean	416,302	11,1933	4,36136	23,0791
Standard Deviation	11,9656	2,42774	0,06646	5,11005
Pro7-90%Ca	415	11,54	4,46376	22,0103
Pro8-90%Ca	298,281	9,766	3,12166	19,8174
Pro9-90%Ca	371,406	10,169	3,98753	20,081
Mean	361,562	10,4917	3,85765	20,6362
Standard Deviation	58,9788	0,92998	0,68041	1,19725
Total Mean	398,073	10,7681	4,2738	21,7281
Total Standard Deviation	65,7547	2,2441	0,72779	4,882

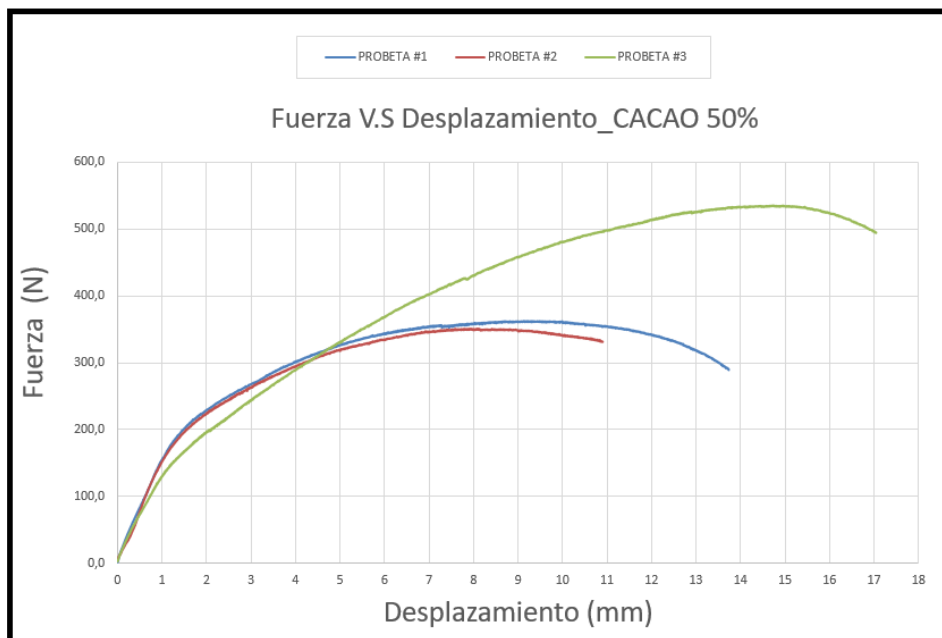


Figura 34. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de Cacao del 50% Elaboración propia

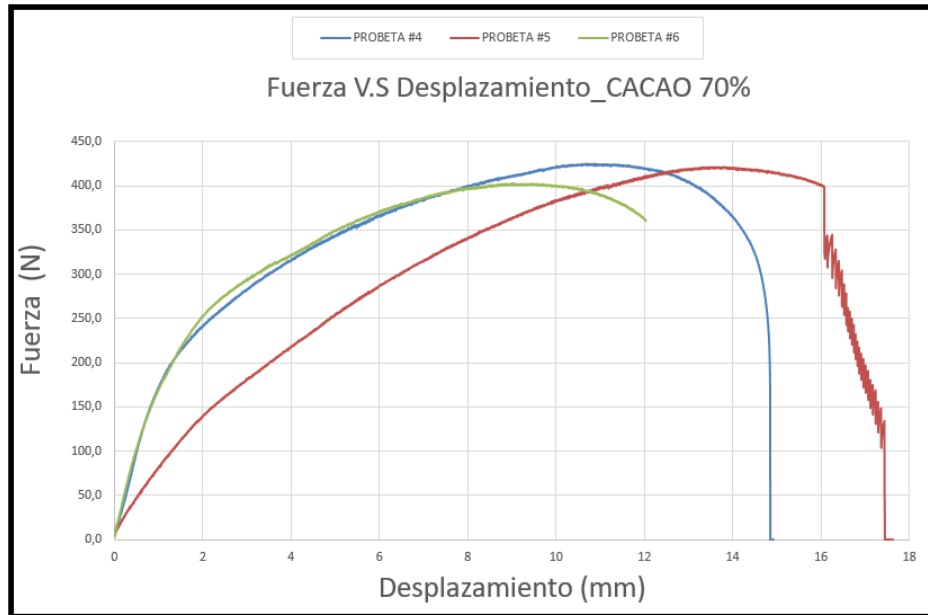


Figura 35. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de Cacao del 70% Elaboración propia

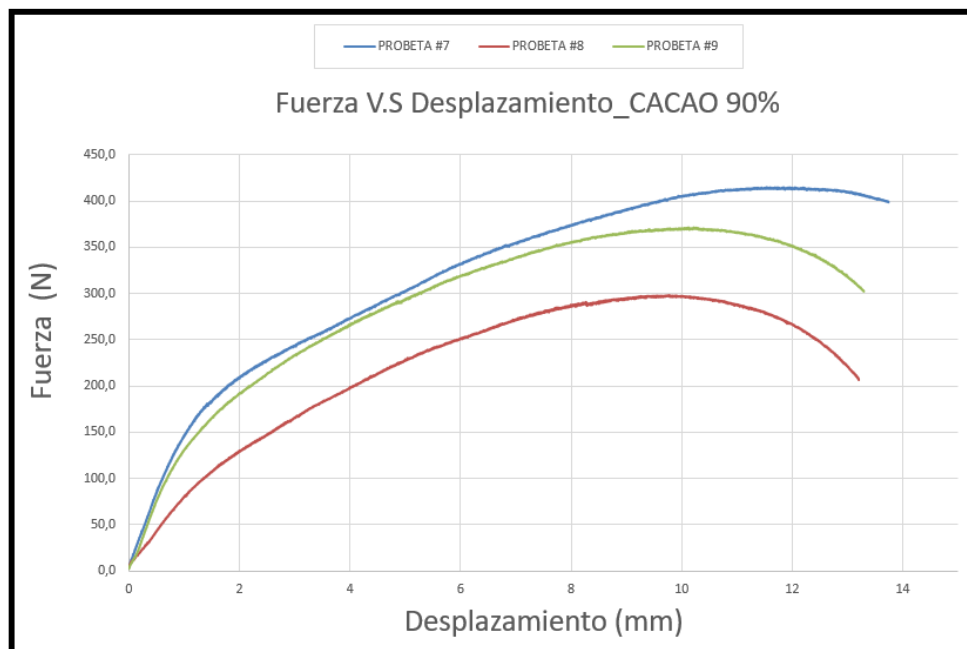


Figura 36. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de Cacao del 90% Elaboración propia

Como se observa en las Figuras 34, - 35 y -36, los tres grupos presentaron comportamientos plásticos con desplazamientos hasta de 18 mm. En todos, se presentó la misma tendencia de

resistencia a la compresión en un punto alto y empezaron a decaer la carga hasta el punto de rotura. Es importante recalcar que la curva de la probeta 5 (Figura 35) se presentan unas líneas discontinuas producidas a que, en el momento del ensayo, esta se doblo tanto que salió de la máquina. Finalmente, las probetas que mejores propiedades mecánicas presentaron en terminos de resistencia a la compresión contienen un 70% de cáscara de cacao; no solo por su máximo esfuerzo si no por su % de deformación máxima.

5.2.3 Ensayo de Flexión

Para las probetas de flexión, el equipo se ajustó para que las distancia entre soportes fuera de 40mm. Este ensayo, se realizó a tres puntos. Es decir, la de los soportes y la carga aplicada. Una de las características importantes que presentó esta prueba es que el lado convexo es un esfuerzo a tracción y el lado cóncavo es un esfuerzo a compresión. Para el ensayo la velocidad del equipo se ajustó de acuerdo con la norma ASTM D790 a 0.6 mm/s. Es importante recordar que la fuerza que se ejerció sobre la probeta, fue a cortante y se presentaron unos momentos flectores.

De acuerdo con los resultados obtenidos y las gráficas de los dos ensayos previamente realizados en el presente proyecto, se puede inferir que, para este caso, el esfuerzo máximo tampoco iba a sobrepasar los 5 MPa, y la carga no iba ser mayor a los 5 kg. Con este ensayo, el objetivo se centralizo en conocer si era capaz de soportar una masa determinada dadas las condiciones del estudio.

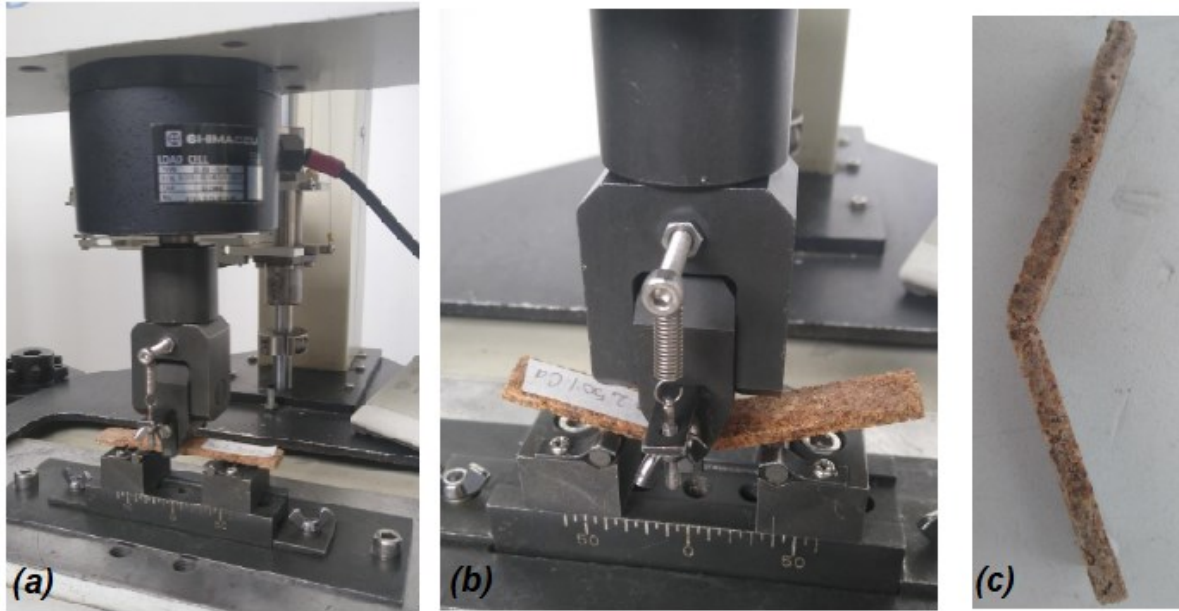


Figura 37. (a) Disposición de la probeta, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza. Elaboración propia (Flexión)

Tabla 16. Medidas Introducidas en el equipo. Media y desviación estándar

Name:	Thickness	Width	Lower Support
Size Unit:	mm	mm	mm
Pro1-50%Ca	4,03	15,08	40
Pro2-50%Ca	4,037	14,78	40
Pro3-50%Ca	4,17	14,86	40
Pro4-70%Ca	4,39	14,88	40
Pro5-70%Ca	4,62	15,01	40
Pro6-70%Ca	4,64	14,87	40
Pro7-90%Ca	4,82	15,21	40
Pro8-90%Ca	4,94	14,7	40
Pro9-90%Ca	5,31	14,65	40
mean	4,55	14,89	-
Standard Deviation	0,44	0,18	

En la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de flexión, donde se observa, que los esfuerzos máximos se acercan mucho a los esfuerzo máximos de tensión, y a pesar de que el % de deformación es mayor, en la prueba de tensión sigue siendo menor. Es decir, nuevamente se pudo intuir que la cáscara acompañada con un aglutinante presentó fragilidad y no ductilidad, muy similar al comportamiento de la madera.

Tabla 17. Resultados obtenidos del Equipo (flexión). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos - UNAL

Name	Max_Force	Max_Disp	Max_Stress	Max_Strain
Parameter				
Units	N	mm	N/mm2	%
Pro1-50%Ca	13,3578	1,488	3,27247	2,24874
Pro2-50%Ca	9,5375	2,7175	2,37571	4,11396
Pro3-50%Ca	10,9438	1,518	2,54113	2,37377
Mean	11,2797	1,90783	2,72977	2,91216
Standard Deviation	1,93217	0,70135	0,47721	1,04267
Pro4-70%Ca	22,4469	2,007	4,69651	3,30402
Pro5-70%Ca	24,0703	2,43	4,50784	4,20998
Pro6-70%Ca	26,2219	3,438	4,91437	5,98212
Mean	24,2464	2,625	4,70624	4,49871
Standard Deviation	1,89365	0,73516	0,20344	1,3622
Pro7-90%Ca	23,0656	1,383	3,91646	2,49977
Pro8-90%Ca	24,4578	2,044	4,0907	3,78651
Pro9-90%Ca	29,4766	3,0455	4,28155	6,06435
Mean	25,6667	2,1575	4,09624	4,11688
Standard Deviation	3,37213	0,83704	0,18261	1,80511
Total Mean	20,3976	2,23011	3,84408	3,84258
Total Standard Deviation	7,19824	0,72983	0,91861	1,43686

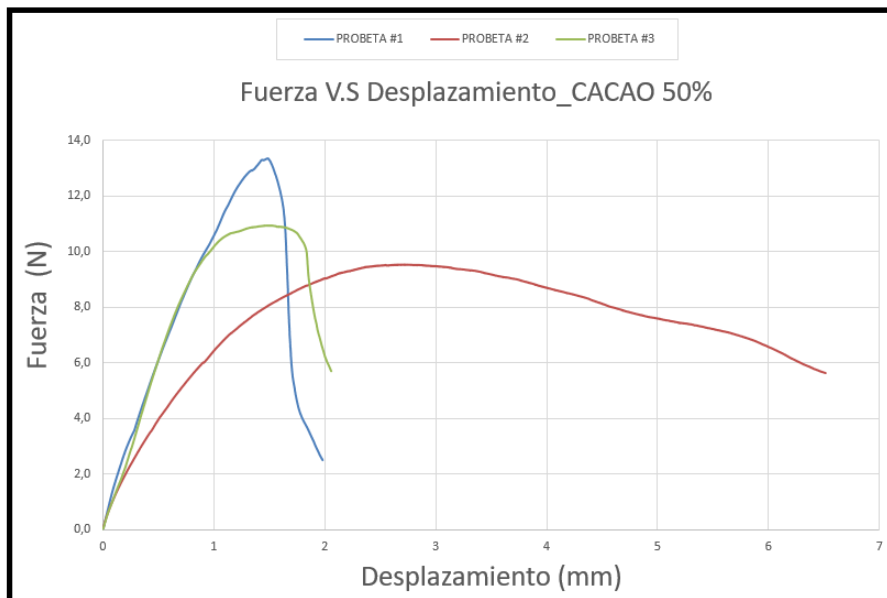


Figura 38. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de cacao del 50% Elaboración propia

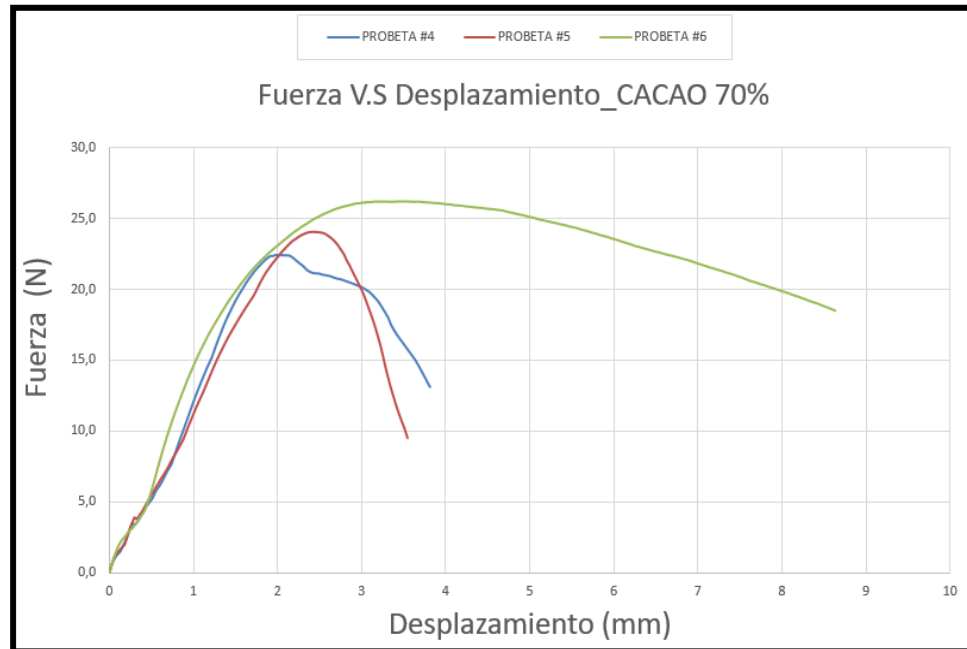


Figura 39. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de cacao del 70% Elaboración propia

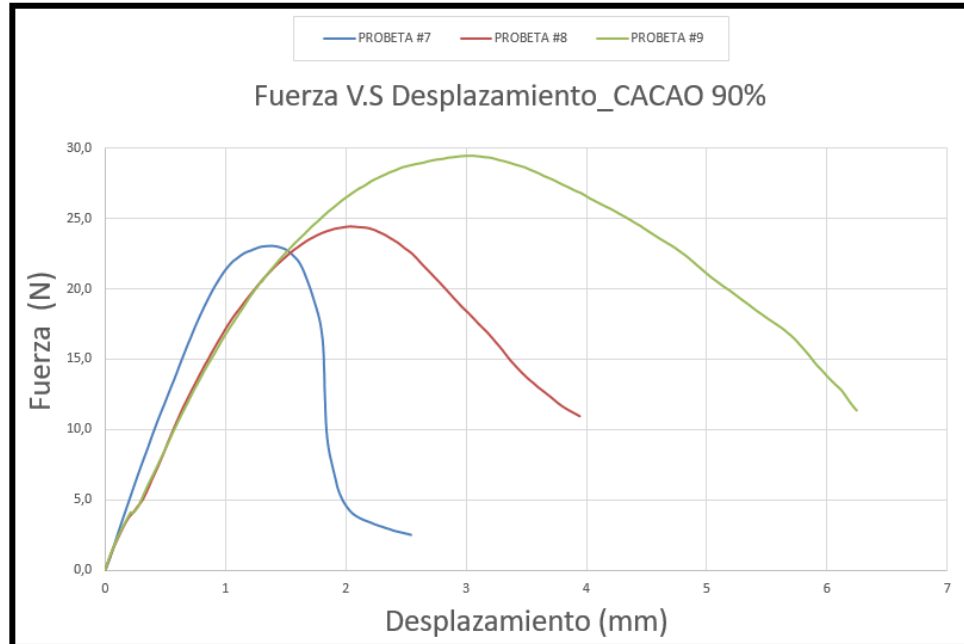


Figura 40. Diagrama Fuerza VS Desplazamiento. Porcentaje de cáscara de cacao del 90% Elaboración propia

Dados los resultados, el que mejor se comportó a flexión son las probetas con contenidos de 90 % de cáscara de cacao con esfuerzos máximos de 4.28 MPa. Pero, a pesar de ser la que mejor se comportó a flexión lo máximo en masa que puede soportar son 2.05 kg (masa máxima para que aún el material se encuentre en su zona elástica y no plástica).

5.2.4 Ensayo de Impacto

La prueba de impacto, en comparación con las demás, es una de las más rápidas y fáciles de realizar. Solo basta con colocar la probeta sobre un soporte en la base del equipo para que el péndulo con un determinado ángulo y masa golpee la muestra con determinada energía potencial. Básicamente, este ensayo Izod es importante hacerlo para conocer la tenacidad del material cuando este es impactado o golpeado. Solo es necesario diligenciar en el software el espesor y el ancho de la probeta. En la Figura 41 se observa la disposición correcta de la probeta en la máquina y como ésta una vez golpeada queda. Al fracturarse por la mitad, el material se puede decir que tuvo un comportamiento frágil. En caso de haber sido dúctil este, la probeta no se hubiera fracturado por la mitad sino más bien esta hubiera quedado doblada.

Finalmente, en la tabla 18 se muestra la tenacidad para cada una de las probetas medidas. Las unidades finales se dejaron en $\frac{J}{m^2}$. Evidentemente, la tenacidad para este tipo de materiales con residuos agroindustriales es pequeña, en comparación con el acero estructural, por ejemplo.

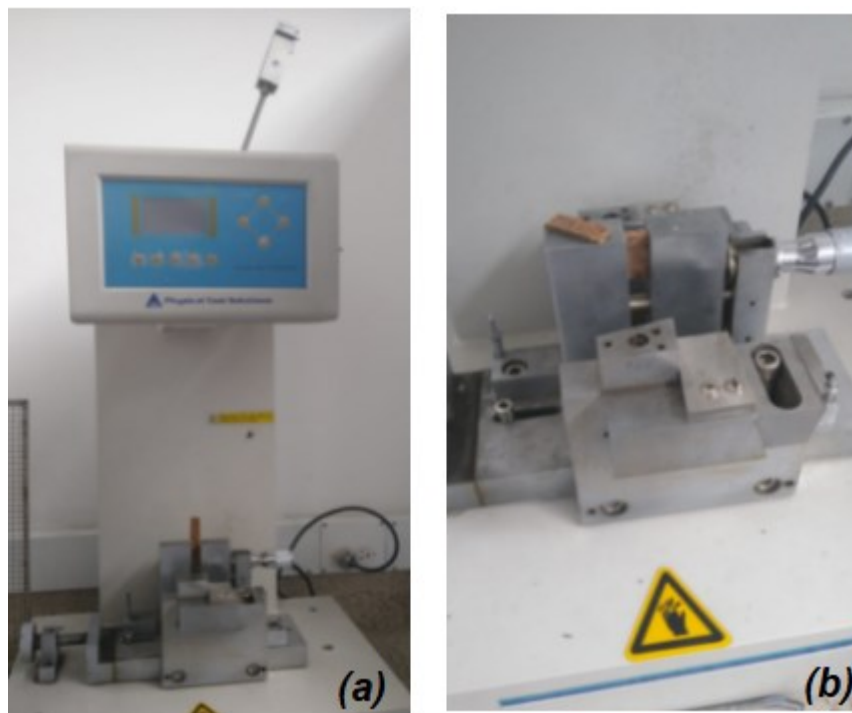


Figura 41. (a) Disposición de la probeta, (b) y (c) Probeta después de aplicada la fuerza. Elaboración propia (Impacto)

Tabla 18. Resultados obtenidos del Equipo (impacto). Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL

PROBETAS	ÁREA	ENERGIA	TENACIDAD
	[mm ²]	[J]	[J / m ²]
Pro1-50%Ca	44,0122	0,0330	749,79
Pro2-50%Ca	41,4720	0,0290	699,27
Pro3-50%Ca	41,3012	0,0400	968,49
Pro4-70%Ca	46,9359	0,0380	809,61
Pro5-70%Ca	47,0652	0,0460	977,37
Pro6-70%Ca	45,7460	0,0430	939,97
Pro7-90%Ca	46,7544	0,0510	1.090,81
Pro8-90%Ca	48,4608	0,0510	1.052,40
Pro9-90%Ca	57,7800	0,0710	1.228,80
Mean value	46,6142	0,0447	-
Standard Deviation	4,8812	0,0124	-

En las Figuras 42 y 43 se muestran los parámetros agregados al software para garantizar que el ensayo estuviera acorde con lo establecido en la norma. Para completar, la probeta que mejor presentó tenacidad es la que contiene 90 % de cáscara de cacao.

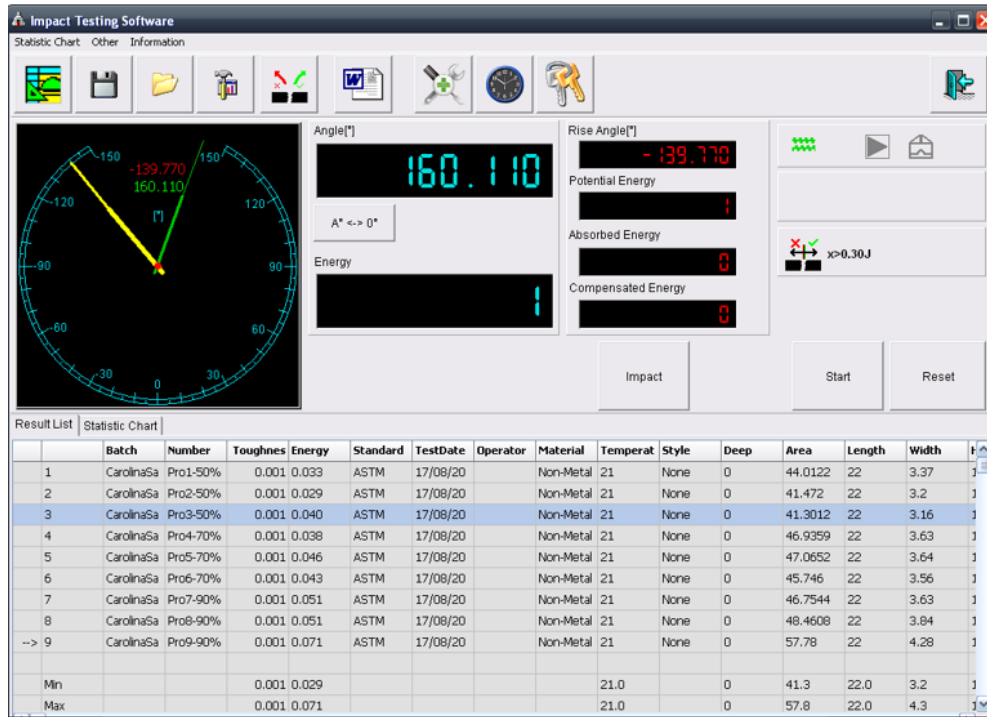


Figura 42. Parámetros del equipo [A]. Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL

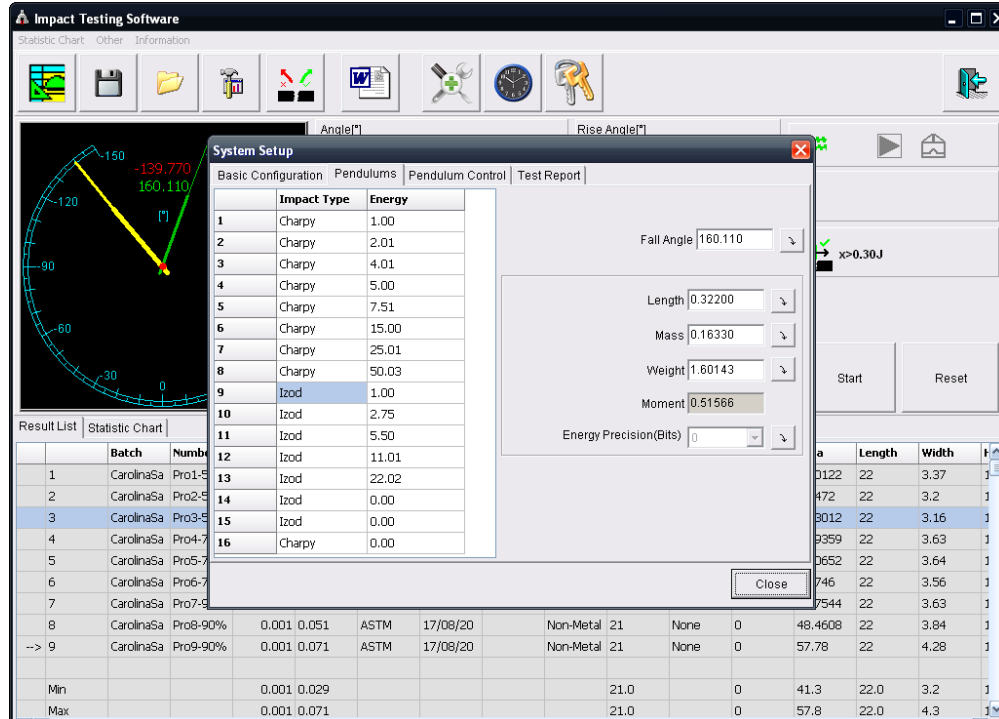


Figura 43. Parámetros del equipo [A]. Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL

NOTAS ACLARATORIAS:

Todas las probetas, fueron ensayadas en el laboratorio de ensayos mecánicos con una temperatura de 22°C y humedad relativa del 44.1%.

En todas las probetas, se realizaron tres mediciones en diferentes partes de la probeta y se promediaron. El resultado fue el depositado en cada software de los equipos.

5.2.5 Materiales aplicados en el campo de la Ingeniería

Como ya se había mencionado en el numeral 3, los materiales se pueden clasificar en cuatro grupos que son: Metálicos, Polímeros, Cerámicos y Compuestos. Y cada uno de ellos, a su vez presentan diferentes propiedades mecánicas que las caracterizan [3]. Es importante primeramente conocer cuál es el propósito del diseño o la utilidad que se le quiere dar al material. Por ejemplo, si se trata de un recipiente a presión que trabaja a unas temperaturas elevadas lo más recomendable es emplear un tipo de acero estructural y no un tipo de madera.

Ahora bien, cada tipo de material tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, en el caso del acero (perteneciente al grupo de metálicos), uno de los materiales más empleados en el campo de la ingeniería, presenta una gran resistencia mecánica; para temas constructivos se hace de forma rápida, es relativamente económico, dúctil, tiene una alta tenacidad, y abunda en el mundo. Sin embargo, en temas de mantenimiento es costoso y cuando estos están expuestos a la intemperie y a condiciones ambientales agresivas la corrosión es el enemigo número uno.

Llegados a este punto, es importante mencionar que en el campo de la ingeniería existe una gran variedad de tipos de acero como, por ejemplo: Inoxidable, laminados, dulces, estructurales, negros, suaves, corrugados y aleados, entre, [45] y este mismo principio aplica para los demás grupos de materiales. Es por ello, y para usos prácticos que en el presente trabajo se habla de forma general para así poder determinar y encontrar posibles usos del material fabricado a base de cáscara de cacao.

Sin embargo y a pesar de que en la actualidad se siguen usando muchos materiales que se clasifican en los grupos ya mostrados. La ingeniería de materiales se ha venido enfocando en temas de salvaguardar y cuidar el medio ambiente, y ya hoy día se habla de materiales biodegradables, que básicamente hacen referencia a un tipo de material que se puede descomponer en un corto tiempo y no alterar al medio ambiente [46]. Algunos ejemplos de estos son la madera, el papel, la lana, residuos orgánicos y cartón entre otros.

En la Figura 44, se ilustra el tiempo de degradación que presentan algunos materiales. En el caso de las bolsas de plástico, (un tipo de polímero) el tiempo es entre 100 a 1000 años al igual que las tarjetas telefónicas. Y en el caso del vidrio (material compuesto, duro, frágil y transparente) su descomposición natural es de 4000 años. Es decir, y como se aclaró al inicio del presente capítulo, presentan sus ventajas y desventajas.



Figura 44. Descomposición de algunos materiales. Tomado de [45]

Dicho lo anterior, y ya centralizando el asunto en el material compuesto hecho de cáscara de cacao y acetato de polivinilo (colbón), este se puede clasificar en el grupo de materiales compuestos posiblemente biodegradables, debido a que dentro de su estructura presenta un

sub-producto agroindustrial. Con base a los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de tensión, flexión, compresión y a las propiedades mecánicas que se determinaron en cada uno de los ensayos se realizó una comparación de este, con los cuatro grupos de materiales presentes en el campo de la ingeniería.

Para comprender los valores presentados en la tabla 19, el lector deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Para la densidad de los diferentes grupos de materiales, se tomará un valor promedio para ser comparado. Se considera de esta manera debido a que existe una infinidad de materiales (y no es alcance de este proyecto conocer todos los materiales de la naturaleza). Por ejemplo, en el caso de los polímeros pueden sobrepasar la cantidad de 20. La razón radica simplemente en la estructura molecular que presenta [47]. También para el caso de la madera, ocurre lo mismo, ya que existen diferentes tipos de madera que se clasifican en ligeras, semiligeras, semi pesadas, pesadas y muy pesadas [48]. Sin embargo, para efectos comparativos se selecciona la que más se asemeja al resultado obtenido en los ensayos.
- El módulo de elasticidad de la madera varía de acuerdo al tipo de madera. De igual manera, se selecciona la que más se asemeja a los resultados de las probetas de cáscara de cacao.
- En general, para todas las propiedades mecánicas de los materiales, los valores descritos varían de acuerdo con lo encontrado en la literatura.
- Se adiciona como un caso especial la madera, debido a que durante el desarrollo del presente trabajo final fue la que más se asemejó al material de cáscara de cacao.
- Para efectos de comparación, se seleccionó la probeta que sería la ideal en términos de propiedades mecánicas.
- Para la resistencia a la flexión, se contempló un polímero termoplástico la cual no se rompe con facilidad. Es posible, que un termoestable, pueda tener un punto máximo de resistencia, pero no es el objetivo de estudio.
- No se contempló la tenacidad en la comparación como resultado del ensayo de impacto en el cuadro comparativo. Simplemente se indica en el ítem 6.2.4 la tenacidad para una de las probetas sometidas a esta prueba.

Tabla 19 . Cuadro comparativo de las propiedades mecánicas. Elaboración Propia

	Acero	Polimero	Cerámico	Materiales compuestos	Madera	Probeta de Cacao	
						Cacao	N° Probeta
Densidad (Kg/m3)	7850	1,32E-06	2000	1,75	340	368	-
Módulo Elástico (GPa)	205	2,1	73 -483	6,9 - 76	0,3 - 0,4	0,3085	Prob 7. 90% Ca.
Límite de Fluencia (Mpa)	250	50	23 - 50	150 - 175	4 - 9	3,635	Prob 7. 90% Ca.
Resistencia a la Tensión (Mpa)	480	60	60 - 80	225 -250	5 -18	3,646	Prob 7. 90% Ca.
Punto de Rotura (Mpa)	840	41 -82	55 - 35	90 - 25	8 - 25	3,646	Prob 7. 90% Ca.
Resistencia a la compresión (Mpa)	420		90 - 125	125 - 185	4,3 5,7	5,87	Prob 3. 50% Ca.
Resistencia a la Flexión (Mpa)	185	-	8,02 - 26,87	100 - 175	1,7 -3	4,91	Prob 6. 70% Ca.

De acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 19, es evidente que un material que está compuesto por un tipo de elemento natural no va a presentar propiedades mecánicas “altas” en comparación con los aceros. Adicional, desde un punto de vista industrial priman otros factores como, por ejemplo: El acabado superficial, resistencia a altas temperaturas, peso, conductividad eléctrica.

En conclusión, el material que más se asemeja a las probetas de cáscara de cacao como fuente primaria son las maderas, no solo por sus propiedades mecánicas si no por su aspecto.

5.3 Paquete de trabajo No. 3

Una vez realizadas las probetas, y de haberlas sometido a una serie de ensayos mecánicos y finalmente de hacer una revisión bibliográfica a lo largo del presente trabajo. Se concluye que el material compuesto fabricado con cáscara de cacao y acetato de polivinilo si puede tener usos a nivel industrial muy similares a la madera siempre y cuando no se vea sometido a grandes esfuerzos mecánicos.

Si bien, en el capítulo del paquete de trabajo No.2 se realizaron cada uno de los ensayos propuestos en el presente trabajo y se realizó el análisis respectivo, es importante conocer la superficie de la fractura que el espécimen presenta, resultado de una carga externa que llega a generar una falla súbita, donde el material pasa de una zona elástica a una zona plástica

con un mínimo de deformación. En la figura 45 (b) se observa un tipo de fractura plana donde la presencia de microhuecos (Ver figura 46(a)) aumenta en tamaño a medida que la carga crece, y al ser estos, concentradores de esfuerzo (Este tipo de fracturas, se genera en gran medida por el proceso de manufactura, tal vez durante la fabricación evitar la presencia de puntos intersticiales fue una variable difícil de controlar) se genera una rápida propagación de grieta típico de materiales frágiles. Adicionalmente, este tipo de fractura suele ser de tipo intergranular, es decir que la propagación ocurre en los límites de grano o trasgranular, que ocurre cortando los granos (Esto depende de un estudio metalográfico posterior que permita determinar el tipo de fractura).

Algo semejante ocurre con las probetas que fueron sometidas a esfuerzos de tensión. A pesar de tratarse de una fractura frágil, en la zona intermedia de la probeta tiende a ser una fractura dúctil por el pequeño cuello que se genera. Sin embargo, su deformación sigue siendo mínima. Posiblemente, este fenómeno físico se debió a que en esa zona de ruptura era más notoria la presencia de acetato de polivinilo que de cáscara de cacao. Conviene subrayar que, lo anterior es un análisis cualitativo no concluyente, debido a que para este tipo de análisis es recomendable hacer uso de un microscopio electrónico de barrido.

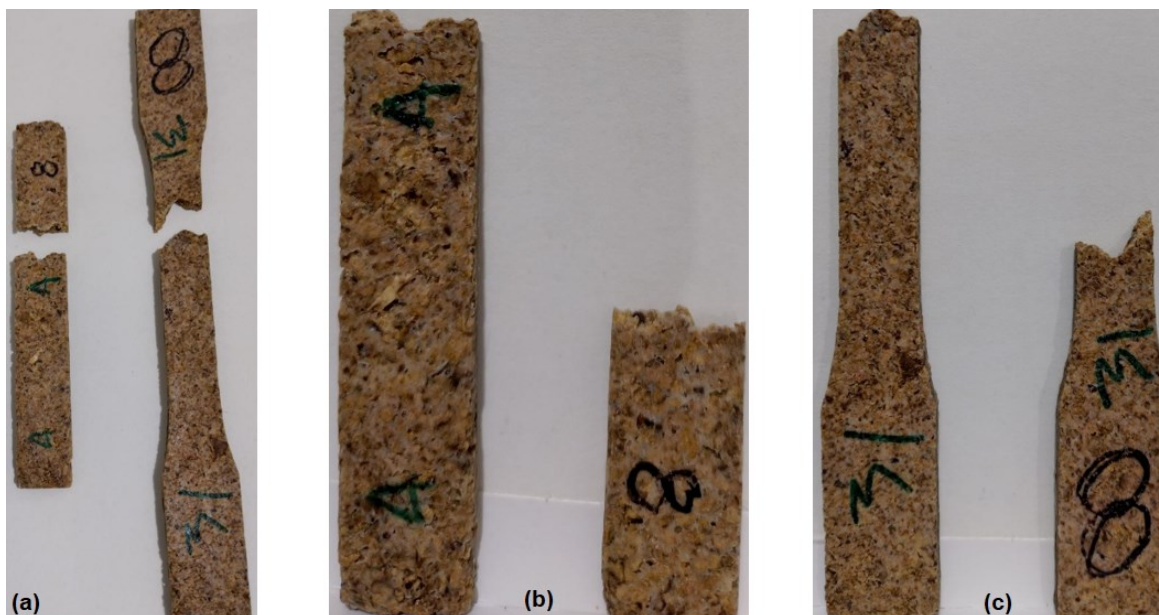


Figura 45. (a) Fractura. Probeta de tensión e impacto, (b) Ampliación probeta de Impacto, (c) Ampliación probeta de tensión

Dicho lo anterior, durante los procesos de manufactura internamente el material puede presentar diferentes tipos de discontinuidades. En la figura 46 (a), se puede apreciar que, en este caso, la “posible falta de presión” al momento de la compactación genera microhuecos causantes de la propagación de la grieta e inclusive porosidades agrupadas que puede terminar en agujeros más grandes, independientemente el origen de la propagación de la grieta este en una posición diferente tal como se evidencia en la figura 46 (b).

Ahora bien, adicional al entendimiento del análisis de la fractura. Se hace necesario comprender desde un punto de vista de materiales la interfase de cada elemento que compone el espécimen. Sin embargo, cabe resaltar que esto depende de las proporciones y varía una con respecto a la otra (como se evidencio en el paquete de trabajo No. 2 las propiedades mecánicas varían dependiendo del porcentaje de la cáscara de cacao). En la figura 46 (c) se evidencia por ejemplo que el predominante es el acetato de polivinilo y cubre la mayor parte de la muestra, pero a su vez la presencia de burbujas generadas por una no adecuada solidificación llega a ser la causante de una posible falla.

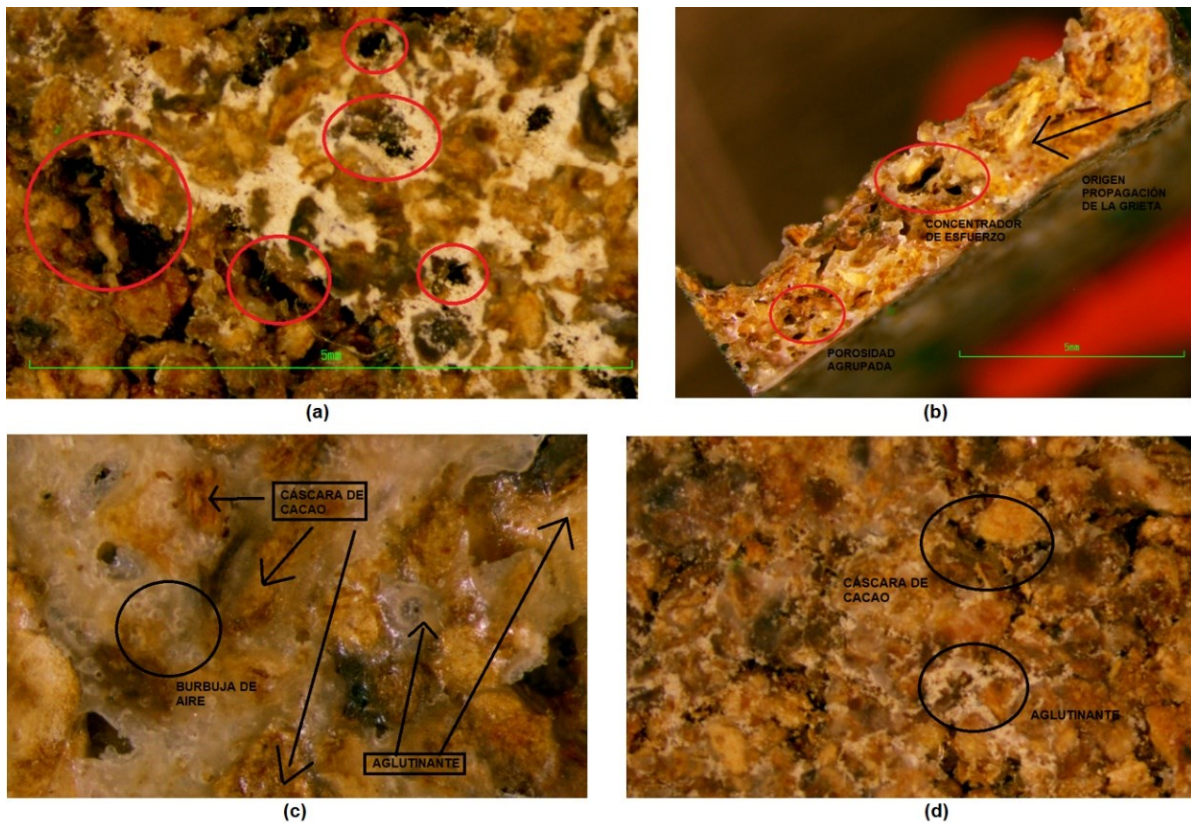


Figura 46. (a) Puntos intersticiales, (b) Superficie de fractura, (c) Interfaz cáscara de cacao vs. aglutinante – En mayor proporción, y (d) Interfaz cáscara de cacao (Color marrón) vs. Aglutinante (Color blanco)

Por otra parte, al observar la figura 46 (d) el panorama es distinto puesto que se logra diferenciar entre la cáscara de cacao y el aglutinante quedando la interfase con proporciones aparentemente “iguales”. Nuevamente, es importante resaltar que este análisis cualitativo es no concluyente debido a que para este tipo de análisis es recomendable hacer uso de un microscopio electrónico de barrido.

En este punto es importante mencionar, que al momento de seleccionar el material se debe tener como mínimo unos parámetros de diseño (Ingeniería conceptual) donde se conozca cuáles van a ser las cargas y esfuerzos a los cuales va a estar sometido. Por ejemplo, si se desea colocar un elemento decorativo sobre una base (a una altura de 5 cm del piso). El material que se seleccione debe tener buena resistencia a la compresión para garantizar que no vaya a fallar llegue al punto de rotura. Además, de que se debe tener en cuenta la altura a la cual va a estar elevada porque si la relación entre el área de la sección transversal y el largo del espécimen es “grande” se va a presentar pandeo, una deformación plástica permanente y una posible ruptura. Ahora suponiendo que el elemento decorativo tiene una masa promedio entre 20 a 25 kg, el material compuesto con cáscara de cacao con un 90% de este, puede soportar esta masa sin llegar a tener una fractura súbita teniendo factores de seguridad mayores a 1. Ahora, si se llegase a seleccionar otro tipo de probeta con porcentajes al 50% o al 70% este de igual manera no sufriría deformación permanente pues a estos porcentajes su resistencia a la compresión fue mayor.

Entonces, como se evidencio en el anterior ejemplo, el uso del material fabricado puede tener diferentes aplicaciones de uso industrial. Lo relevante, es tener claro para que se va utilizar y si va a sufrir más esfuerzos de tensión, compresión, flexión o impacto como ejercicio cualitativo. Es importante, mencionar que en el ejemplo expuesto previamente no consideran todas las variables necesarias para robustecer el diseño y la selección del material.

Ahora bien, con base a la tabla 19 presentada en el paquete de trabajo No.2 y de acuerdo con los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, la que más se asemejó a las probetas fabricadas teniendo como fuente primaria la cáscara de cacao fue la madera. Sin embargo, estas a su vez se clasifican dependiendo de sus propiedades. En la tabla 20, se presenta un cuadro comparativo de los diferentes tipos de madera según su clasificación, y claramente el material compuesto entre cascara de cacao y acetato de polivinilo se asemeja más a un tipo de

madera ligera que puede oscilar entre un Paulownia y un chopo (dada la similitud en las densidades)

Tabla 20. Cuadro Comparativo. Clasificación Tipos de madera. Tomado de [60]

CLASIFICACIÓN	EJEMPLO	DENSIDAD (Kg/m ³)
Madera Ligera (< 500 kg/m ³)	Madera de balsa	100 - 150
	Paulownia	265 - 280
	Chopo	370
	Cedro Rojo	370
	Samba	380
	Tilo	415
	Sequeoia	400 - 430
Madera medio ligera	Abeto, Cedro y Aliso	500 - 599
Madera de peso medio	Pino Insignis	600 - 699
Madera pesada	Haya y Roble	700 - 799
Madera muy pesada	Elondo y Wenge	> 800

Algunas posibles aplicaciones de este material compuesto a base de cacao son:

- Todo lo relacionado a temas de oficina y escritorio como son porta lápices, porta retratos, pisa papeles, portavasos e individuales
- Porta llaves
- Percheros
- Elementos decorativos para el hogar reemplazando el uso de la madera
- Servilleteros
- Cajas para guardar joyas
- Marcos a base de cacao para fotografías o diplomas

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Los materiales obtenidos a partir de los subproductos de cacao, abren nuevos caminos hacia la investigación referente al aprovechamiento de este. Al momento de la extracción de la semilla, al año se desperdician cientos de toneladas, y es allí donde la ingeniería de los materiales debe aprovechar esta materia prima para la creación de nuevos materiales que favorezcan a la innovación y el crecimiento económico de un país.

Como todo proceso de ingeniería, es importante tener clara una metodología la cual permita tener éxito con la ejecución de un proyecto. Con la propuesta presentada por parte del autor de obtener materiales a partir de cáscara de cacao como fuente primaria se logró determinar la mejor forma para adquirir un producto de calidad en su etapa temprana de investigación. La logística desde la recepción de la cáscara de cacao y el paso a paso de la realización de ensayos destructivos de tensión, compresión, flexión e impacto seguidos por una comparación de los diferentes materiales aplicados al sector de la ingeniería de forma global indican, que efectivamente hay mucho por descubrir con este producto que nos brinda la madre tierra.

La mejor alternativa se encamino en la trituración del cacao con humedades por debajo del 15% muy similares a las de la madera. A su vez se identificó que el mejor proceso de secado es el que se hace al medio ambiente para este caso, debido principalmente a su bajo costo pensando en un proceso industrial. De igual manera, se hizo necesario definir el mejor aglutinante que acompañaría la cáscara de cacao. Para esto, en su etapa inicial, se contempló la resina epoxi, aunque no presentó los mejores resultados por su presentación, dificultad al momento de la fabricación y tiempos de secado, adicional a que el ambiente debía estar bajo unos parámetros indicados de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Nuevamente, la literatura ayudo a resolverlo y la mejor forma se presentó con acetato de polivinilo (Colbón), aglutinante también aplicado en la madera.

Con respecto a la fabricación de las probetas, se puede concluir que la presión y la temperatura al momento de la compactación se logran resultados satisfactorios en términos

generales de propiedades mecánicas. Sin embargo, esta presión debe ser mayor a la definida en el proyecto para que las partículas compacten mejor. Llegados a este punto, de incluir el proceso de tamizado en la metodología aplicada, se concluye que las densidades mejoran si las partículas tienen diámetros y formas distintas pues esos puntos intersticiales se pueden compensar con tamaño de granos más pequeños. Es decir, no se hace necesario tamizar.

Otro aspecto relevante, radicó en los porcentajes del contenido de la cáscara de cacao. En este caso, se contemplaron al 50% - 70% y 90%. Ahora bien, al momento de realizadas las pruebas mecánicas, los valores de esfuerzo y desplazamiento variaron a pesar de pertenecer al mismo grupo y de haber realizado la repetición tres veces. Probablemente, debido a factores de fabricación y a los tamaños de grano.

A pesar de que se esperaba que un solo grupo de probetas con contenidos de cáscara de cacao al 50%, 70% y 90% presentara las mejores propiedades mecánicas. El resultado indicó que dependiendo del tipo de ensayo esto puede variar. En tensión es mejor con porcentajes al 50%, en compresión al 70% y en flexión e impacto al 90%.

En conclusión, y basado en los resultados obtenidos se puede decir que materiales compuestos a base de cáscara de cacao pueden ser aplicados en el sector industrial empezando como sustituto de maderas ligeras, pues sus propiedades se asemejan bastante. No obstante, se debe seguir mejorando la mejor metodología y seguir incentivando en este tipo de investigaciones para obtener mejores resultados.

6.2 Recomendaciones

Con base al proyecto realizado y en pro de seguir incentivando en las investigaciones relacionadas al aprovechamiento del subproducto de cacao. A continuación, se presentan unos puntos que se podrían mejorar o seguir incursionando.

- Aumentar la presión de compactación de las muestras a estudio.
- Aplicar una metodología que permita distribuir de mejor manera los tamaños de grano dentro de la probeta para evitar esos puntos intersticiales que se pueden producir.
- Adicional de garantizar las propiedades mecánicas, se recomienda investigar en una solución que permita obtener acabados superficiales más finos.
- Por medio de un estereoscopio se pueden tomar imágenes que permitan conocer los porcentajes de un elemento con respecto al otro. Y este como afecta en sus propiedades. Las imágenes presentadas en la figura 45 fueron tomadas en el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia. **Nota:** Se trató de forma no detallada dentro de la investigación. No era alcance de este proyecto.
- De las partículas generadas por el tamizaje, esta probablemente se puede aprovechar para generar otros procesos industriales como el sandblasting, aplicado en la fabricación de tanques y recipientes a presión.
- Se recomienda, realizar estudios de análisis de fractura de este tipo de compuestos en detalle.
- Detallar en los estudios metalográficos.

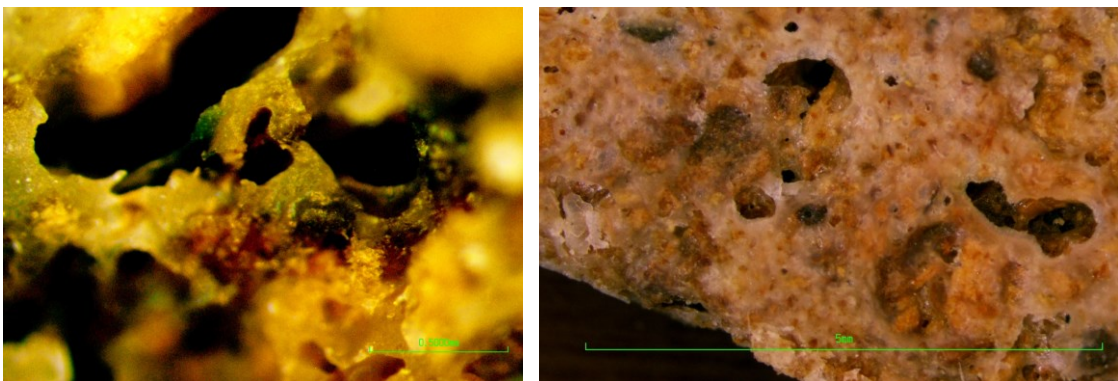


Figura 47. Imágenes Metalográficas. Laboratorio Interfacultades de Ensayos Mecánicos UNAL

7. Bibliografía

- [1] M. Bizarro, M. Metálicos, "Historia de los materiales," Introducción a la ciencia de los materiales, p. 4, 1836.
- [2] IIED, "Capítulo 4 Necesidad y disponibilidad de minerales," *Abriendo Brecha*.
- [3] A. de J. Balvantin García, "Conceptos Básicos, Ciencia de Materiales para Ingeniería," p. 13, 2010.
- [4] Arango, P. Diaz, A. Ramirez, G. "Diseño de una planta productora de artículos a partir de plástico reciclado, basado en la estrategia de la cadena de suministro," Universidad del Salvador, pp.1401 - 2014.
- [5] Peñaranda, L. Montenegro, P. Giraldo, P "Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales en Colombia," *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, vol. 66, pp. 37–39, 2012.
- [6] P. C. Abbott *et al.*, "An Analysis of the Supply Chain of Cacao in Colombia," *Análisis la cadena productiva del cacao en Colomb.*, p. 221, 2019.
- [7] Y. Villamizar, J. Rodriguez, and L. León, "Caracterización fisicoquímica, microbiológica y funcional de harina de cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L .) variedad CCN-51.1," *Cuad. Act.*, vol. 9, no. 2016, pp. 65–75, 2017.
- [8] R. Campos-Vega, K. H. Nieto-Figueroa, and B. D. Oomah, "Cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 81, no. November 2017, pp. 172–184, 2018.
- [9] J. D. Martínez-Ángel, R. A. Villamizar-Gallardo, and O. O. Ortiz-Rodríguez, "Caracterización y evaluación de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) como fuente de energía renovable," *Agrociencia*, vol. 49, no. 3, pp. 329–345, 2015.

- [10] C. A. Forero-Nuñez, J. Jochum, and F. E. S. Vargas, "Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets," *Ing. e Investig.*, vol. 35, no. 1, pp. 17–23, 2015.
- [11] Villamizar, R. "Cáscara de cacao fuente de polifenoles y fibra: Simulación de una planta piloto para su extracción" . *Revista respuestas.*, vol. 22, no. 1, pp 6 - 2016
- [12] Estandar ASTM - American Society for Testing and Materials
- [13] G. Padrón-gamboa *et al.*, "Efecto de la cáscara de cacao en la obtención de espumas de poliuretano para uso hortícola. Propiedades físicas y de biodegradabilidad," *J. Mex. Chem. Soc.*, vol. 48, no. 2, pp. 156–164, 2004.
- [14] Sarmiento, J. " Evaluación del uso de la cáscara de cacao como sustituto parcial de la matriz polimérica en la obtención de espumas de poliuretano", *Fundación Universitaria de América.* vol. 8, no. 2, p. 2019, 2019.
- [15] Diaz, G. Laguado, L. Acosta, O,. "Estudio de comportamiento mecánico a tracción de un material compuesto a partir de polietileno de baja densidad (Reciclado) cargado con bagazo de cáscara de cacao" pp. 7–50, 2554.
- [16] Federación Nacional de Cacaoteros. " Boletín de prensa - Así quedo el ranking de producción de cacao en Colombia". pp. 3–5 -2020
- [17] Análisis, monitoreo y evaluación de sectores. Sectorial. "Informe actualizado 2020 - I" , 2014. Recuperado de: <https://www.sectorial.co/chocolate-y-confiteria>
- [18] M. Franco *et al.*, "Reaprovechamiento Integral de Residuos Agroindustriales: Cáscara y Pulpa de Cacao para la Producción de Pectinas," *Rev. Latinoam. el Ambient. y las Ciencias*, vol. 1, no. 2, pp. 45–66, 2010.
- [19] Indcresa. Productos del cacao., "Proceso del cacao",. Recuperado de: <https://indcresa.com/proceso-del-cacao/>
- [20] Ardila, C. Carreño, S. " Aprovechamiento de la cáscara de cacao de la mazorca de cacao como absorbente",. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga - 2011

- [21] Martínez, E. Mosquera, S. Ospina, K. Rivera, E. Gonzales, J. “ Obtención de un compuesto polimérico a partir de polipropileno fibroreforzado con bagazo de la caña de azúcar” Aprovechamiento de la cáscara de cacao de la mazorca de cacao como absorbente”. pp. 7-50 – 2554
- [22] S. Khanahmadi, F. Yusof, H. Chyuan Ong, A. Amid, and H. Shah, “Cocoa pod husk: A new source of CLEA-lipase for preparation of low-cost biodiesel: An optimized process,” *J. Biotechnol.*, vol. 231, pp. 95–105, 2016.
- [23] Mustanir, Nurdin, B. Ginting, and A. Purnama, “Chemical composition and cytotoxic activities of n-Hexane extract from cacao pod husk (*Theobroma cacao* L.),” *Chem. Data Collect.*, vol. 30, 2020.
- [24] P. Boeckx, M. Bauters, and K. Dewettinck, “Poverty and climate change challenges for sustainable intensification of cocoa systems,” *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 47, pp. 106–111, 2020.
- [25] V. L. Deus *et al.*, “Influence of drying methods on cocoa (*Theobroma cacao* L.): Antioxidant activity and presence of ochratoxin A,” *Food Sci. Technol.*, vol. 38, pp. 278–285, 2018.
- [26] Maldonado, J. “ Aceros y sus aplicaciones”. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería mecánica L. México - 2010
- [27] “Tipo de ensayos a los que pueden ser sometidos los aceros inoxidable”. Sin fecha
- [28] Rodríguez, D. Álvarez, J “ Verificación Del Diagrama Esfuerzo-Deformación De Un Acero Aisi 1020 Templado A Temperaturas Intercríticas Usando La Técnica Rve Por Elementos Finitos”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. Bogotá. 2018
- [29] Mecapedia, “ Ensayo de tracción”. Enciclopedia virtual de Ingeniería Mecánica. Área de Ingeniería Mecánica. Universitat Jaume I, Castellón, España. 24 de junio de 2014.
- [30] Servosis, “Como se realiza un ensayo de compresión”. España. 16 de marzo de 2020.
- [31] Estandar ASTM D638 – Standard Test Method For Tensile Properties of Plastics
- [32] Estandar ASTM D638 – Standard Test Method For Compressive Properties of Rigid Plastics

- [33] Estandar ASTM D790 – Standard Test Method For Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- [34] Estandar ASTM D4812 – Standard Test Method for Unnotched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics
- [35] López, Manuel. “ Parámetros operacionales del proceso de secado y molienda de subproductos de cacao (Theobroma cacao L.). Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá, Colombia. 2020
- [36] Bermejo, Felix – “ Humedad de la madera”. Tableros y molduras TMFB. Sin fecha
- [37] Estandar ASTM E-11 – Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves
- [38] Spavento, Eleana. “ Propiedades mecánicas de la madera” – Universidad de la plata. Facultad de ciencias agrarias y forestales. Argentina. 2008
- [39] Ecología. “ Propiedades de la madera y sus características” . 19 de abril de 2020
- [40] Lozano, José. “ Análisis metalográfico de aceros comerciales para herramientas en la ciudad de Cuenca – Ecuador”. Universidad Politécnica salesiana. Sede Cuenca. Cuenca – Ecuador. 2018
- [41] Nasution, H. Harahap, H. Riani. R. Pelawi, I “Effect of pressing temperature on the mechanical properties of waste styrofoam filled sawdust composite”. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Sumatera. Indonesia, 2018.
- [42] Tecnkad, Technirradiólogos – “Compresión” - 25 años al servicio de la industria nacional” . Bogotá. Sin Fecha
- [43] Escuela universitaria oficios. “ Introducción a las estructuras de madera. Esfuerzos y solicitaciones. Universidad Nacional de la plata. Argentina. Sin fecha
- [44] Valle, Miguel. “Diseño Y Construcción Del Utillaje Para El Método Estándar De Prueba Para Propiedades De Compresión De Polímeros (Astm D695:2015) En El Centro De Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero”. Universidad técnica de Ambato. Ingeniería civil y Mecánica. Ambato – Ecuador. 2020

- [45] Derichebourg. "Tipos de acero". España. Sin fecha
- [46] Encolombia. "biodegradables". Colombia. Sin fecha
- [47] Universitat politecnica de valencia. "Cristalinidad y estereoisomeria de termoplasticos". Polimeros termoplásticos. Curso de fundamentos de ciencia de materiales. Universitat politecnica de valencia. España. Sin fecha
- [48] Aeim. "Clasificación de maderas comerciales según sus características". Asociación española del comercio e industria de la madera". España. Sin fecha
- [49] Mocciaro, Anabella. Lombardi, Maria. Scian, Alberto. "Desarrollo de materiales cerámicos refractarios de baja densidad a partir de agentes ligantes nanoestructurados y carbón". ScienteDirect. Vol. 56, Issue 6. Pages 243 -248. November – December. 2017
- [50] Cabrera, Andres. Granja, Mario. "Comportamiento a tracción del acero estructural, según norma NTC 2289, de diferentes fabricantes de acero de refuerzo en el mercado". Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá. 2017
- [51] Álvarez, Maria (et.al) "Ensayo de flexión para una probeta de Acero SAE 1020". Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería Industrial. Bogotá. Sin fecha
- [52] Hernández, Billy. "Estudio comparativo de la resistencia a la compresión en mezclas de concreto elaboradas con materiales de reciclaje: Plástico y llantas". Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala. Febrero de 2011
- [53] Gonzalez, Benjamin. "Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica". Scielo. Brazil. Rio de Janeiro. 2018
- [54] Microscopía Electrónica de Barrido. Scai.uma.es .España. 2016
- [55] Análisis de Fractura. Capítulo VI. Sin fecha
- [56] Maderame. "Clases de tableros de madera: Clasificación, propiedades y utilización". Colombia. Sin fecha

- [57] Tecnología de los Plásticos. “Acetato de Polivinilo”. Febrero de 2012
- [58] Topkit. “Que es el tablero de aglomerado o conglomerado”. Octubre de 2014
- [59] Tknika. “Manual Técnico de formación para la caracterización de madera de uso estructural”. Eusko Jaurlariza. Gobierno Vasco. España. Sin fecha
- [60] Maderame. “Maderas Ligeras Y Resistentes: Listado De Especies”. Colombia. Sin fecha