



# **Estudio de propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz en polipropileno con fibra de guadua y polvo de cerámica.**

**Yeisy Lisseth Pineda Daza**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica - FIMEB  
Tunja, Colombia  
2020

# **Estudio de propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz en polipropileno con fibra de guadua y polvo de cerámica.**

**Yeisy Lisseth Pineda Daza**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electromecánico**

Director:  
M.I. Jefferson David Salamanca Cárdenas

Línea de Investigación:  
Materiales de ingeniería.

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica - FIMEB  
Tunja, Colombia  
2020

## NOTA DE ACEPTACION

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Antonio Nariño sede Tunja para optar al título de Ingeniero Electromecánico

---

M.I. Jefferson D. Salamanca C.

Director

---

PhD Carlos Andrés Palacio Gómez

Jurado

---

Msc. Ing. Omar F. Rojas Moreno

Jurado



## Agradecimientos

Agradezco a la empresa Guadua Factoría en la ciudad de Duitama, que me colaboró con información técnica y facilitó el material necesario para elaborar el material compuesto del presente estudio.

Al ingeniero Diego Pardo Amaya de la FIMEB, Universidad Antonio Nariño de Bogotá sede Sur, por la gestión para facilitar el uso del laboratorio de materiales para los ensayos mecánicos requeridos y la ayuda del ingeniero Luis Muñoz quien fue la persona que me ayudó al momento de realizar las pruebas.

A la Universidad Antonio Nariño sede Tunja por ser la institución en donde he llevado a cabo mis estudios satisfactoriamente y así realizar mi formación a nivel profesional.

Finalmente, el acompañamiento técnico, moral y profesional de los docentes e ingenieros Jefferson Salamanca y Diego Muñoz, quienes me guiaron en el desarrollo de este trabajo además de brindarme su apoyo y consejo en el transcurso de este proceso.

*“Ser positivo no significa que las cosas vayan a salir bien,  
Sino saber que estarás bien sin importar como resulten.”*

*Norman Vincent Peale*



## Resumen

El uso de fibras de origen natural como refuerzo en Materiales Compuestos (MC por sus siglas en español), ha venido tomando fuerza en los últimos años. En este caso se tiene un MC con matriz de polipropileno (PP por sus siglas en inglés y español) reciclado, proveniente de tapas de diferentes envases de productos de consumo diario; para el refuerzo se eligió usar fibra natural de guadua angustifolia y polvo de cerámica tenaz.

La fibra de guadua se obtuvo en condiciones de secado e inmunizado de acuerdo con el proceso de la empresa que la distribuye, esto con el fin de reducir su humedad y evitar la aparición de hongos y líquenes, lo que permite una correcta adherencia con la matriz. El polvo de cerámica tenaz también es un material reciclado, se obtuvo de pisos de cerámica que se trituraron y pulverizaron previamente a la inserción al MC.

Las proporciones usadas para fabricar las probetas del MC fueron: una con 100 % de PP y otras con diferente composición del MC, donde la matriz de PP se mantuvo con el 60%, y se combinaron los materiales de refuerzo en las siguientes proporciones, obteniendo tres muestras así: una con 30% fibra y 10% cerámica, otra con 33% fibra y 7% cerámica y una última con 35% fibra y 5% cerámica. Una vez obtenidas las probetas del MC, se realizaron los ensayos mecánicos, de tensión según la norma ASTM 638D para polímeros, y de flexión con la norma ASTM 790D para plásticos reforzados. Se analizaron los resultados obtenidos, encontrando que, el módulo de elasticidad a tensión del PP aumentó en un 53.49% al adicionarle guadua en un 35% y cerámica en un 5%; de tal manera que, se permite dar continuidad a más estudios del MC con diferentes porcentajes, modificando la alineación de la fibra y usando los otros tipos de guadua que se pueden encontrar en el país.

**Palabras clave:** *Material compuesto, Polipropileno, Guadua angustifolia, Polvo de cerámica.*

## Abstract

The use of naturally occurring fibers as a reinforcement in Composite Materials (CM) has been taking hold in recent years. In this case, it is a recycled CM with polypropylene matrix (PP) from lids of different packaging of everyday consumer products; for reinforcement, it was chosen to use natural *Guadua Angustifolia* fiber and tenacious ceramic powder.

The *Guadua* fiber was obtained under drying conditions and immunized according to the process of the company that distributes it, to reduce its moisture and to prevent the appearance of fungi and lichens, allowing a correct adhesion with the matrix. Tenacious ceramic powder is also a recycled material, it was obtained from ceramic floors that were crushed and sprayed before insertion into the CM.

The proportions used to manufacture the MC specimens were: one with 100% PP and others with different composition of the MC, where the PP matrix remained with 60%, and the reinforcement materials were combined in the following proportions, obtaining three samples as well: one with 30% fiber and 10% ceramic, another with 33% fiber and 7% ceramic and one last with 35% fiber and 5% ceramic. Once the CM specimens were obtained, mechanical, voltage tests according to ASTM 638D for polymers were performed and bending with ASTM 790D for reinforced plastics. The results obtained were analyzed, finding that the PP stress elasticity module increased by 53.49 % by adding *guadua* by 35% and ceramic by 5%; in such a way that, it is allowed to continue more studies of the CM with different percentages, modifying the alignment of the fiber and by using the other types of *guadua* that can be found in the country.

**Keywords:** *Composite material, Polypropylene, Guadua angustifolia, Ceramic powder.*



# Contenido

Pág.

<b>Resumen</b> .....	<b>V</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VI</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Capítulo: Generalidades</b> .....	<b>17</b>
1.1 Materiales compuestos .....	17
1.1.1 La matriz .....	18
1.1.2 Material de refuerzo .....	20
1.1.3 Procesos de conformación de MC reforzado con fibras .....	26
1.2 Polipropileno (PP).....	27
1.2.1 Propiedades del PP .....	27
1.2.2 Tipos de PP .....	27
1.2.3 Identificación del PP.....	30
1.2.4 Técnicas de conformación del PP .....	31
1.2.5 Reciclaje del PP.....	32
1.3 Guadua angustifolia Kunth.....	33
1.3.1 Usos e impacto de la guadua .....	35
1.3.5 Propiedades físicas de la guadua.....	40
1.4 Cerámica .....	42
1.4.1 Propiedades mecánicas:.....	44
1.4.2 Propiedades térmicas.....	44
<b>2. Capítulo Obtención de probetas</b> .....	<b>47</b>
2.1 Alistamiento materia prima .....	47
2.1.1 Preparación del PP reciclado y triturado.....	47
2.1.2 Preparación de la fibra de Guadua.....	48
2.1.3 Preparación de la cerámica en polvo .....	49
2.2 Proceso de preparación de las diferentes proporciones.....	50
2.3 Mezcla de material.....	51
2.4 Construcción de las probetas.....	52
<b>3. Capítulo Ensayos laboratorio y análisis de resultados</b> .....	<b>55</b>
3.1 Ensayo de tensión .....	55
3.2 Ensayo de flexión .....	59
3.3 Proceso experimental .....	62
3.4 ANOVA pruebas tensión.....	64

---

3.5 ANOVA pruebas flexión.....	70
<b>4. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>78</b>
4.1 Conclusiones .....	78
4.2 Recomendaciones .....	79
<b>5. Bibliografía .....</b>	<b>80</b>
<b>6. Anexos.....</b>	<b>85</b>
1. Anexo: Norma ASTM 638 – D.....	87
2. Anexo: Norma ASTM 790 - D.....	88
3. Anexo: Molino de bolas.....	89
4. Anexo: Certificado Tamiz.....	91
5. Anexo: Extrusora.....	92
6. Anexo: moldes .....	100

## Lista de figuras

Pág.

<b>Figura 1-1.</b> Fases de un material compuesto.....	18
<b>Figura 1-2.</b> Soporte de cargas de la matriz.....	18
<b>Figura 1-3.</b> Tipos de materiales compuestos.....	20
<b>Figura 1-4.</b> Orientación de las fibras.....	23
<b>Figura 1-5.</b> Comportamiento mecánico de los plásticos.....	30
<b>Figura 1-6.</b> Códigos para identificar los plásticos.....	31
<b>Figura 1-7.</b> Identificación del PP.....	31
<b>Figura 1-8.</b> Moldeo por extrusión.....	32
<b>Figura 1-9.</b> Colores para la identificación de residuos.....	33
<b>Figura 1-10.</b> Tipos de bambú.....	33
<b>Figura 1-11.</b> Guaduales en el centro nacional del bambú Colombia.....	35
<b>Figura 1-12.</b> Usos de la guadua.....	36
<b>Figura 1-13.</b> Raíz de guadua.....	36
<b>Figura 1-14.</b> Corte de la Guadua.....	38
<b>Figura 1-15.</b> Secado por aire en forma de trípode (izquierda) y por aire caliente (derecha).....	39
<b>Figura 1-16.</b> Limpieza superficie de la guadua.....	39
<b>Figura 1-17.</b> Prensado en seco de partículas cerámicas: a) y b) llenado, c) prensado y d) extracción.....	43
<b>Figura 1-18.</b> Modelo general de un proceso o sistema.....	45
<b>Figura 2-1.</b> Preparación del PP.....	48
<b>Figura 2-2.</b> Preparación de la guadua.....	49
<b>Figura 2-3.</b> Preparación de la cerámica.....	50
<b>Figura 2-4.</b> Mezcla de los diferentes materiales.....	52
<b>Figura 2-5.</b> Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PP 100.....	53
<b>Figura 2-6.</b> Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PPGC 3505.....	54

<b>Figura 2-7.</b> Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PPGC 3307 .....	54
<b>Figura 2-8.</b> Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PPGC 3010 .....	54
<b>Figura 3-1.</b> Máquina universal de ensayos mecánicos y mordazas para plásticos. ....	55
<b>Figura 3-2.</b> Ambiente grafico del programa: .....	56
<b>Figura 3-3.</b> Prueba preliminar calibración de la máquina de ensayos universal. ....	56
<b>Figura 3-4.</b> Probetas de PP100 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión. ....	57
<b>Figura 3-5.</b> Probetas de PPGC 3505 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión...	57
<b>Figura 3-6.</b> Probetas de PPGC 3307 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión...	58
<b>Figura 3-7.</b> Probetas de PPGC 3010 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión...	58
<b>Figura 3-8.</b> Presencia de burbujas en las probetas de tensión. ....	59
<b>Figura 3-9.</b> Máquina universal adecuada para ensayos de flexión. ....	59
<b>Figura 3-10.</b> Probetas de PP100 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión. ....	60
<b>Figura 3-11.</b> Probetas de PPGC 3505 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión..	61
<b>Figura 3-12.</b> Probetas de PPGC 3307 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión..	61
<b>Figura 3-13.</b> Probetas de PPGC 3010 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión..	62
<b>Figura 3-14.</b> Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas. ....	66
<b>Figura 3-15.</b> Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla. ....	67
<b>Figura 3-16.</b> Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas. ....	69
<b>Figura 3-17.</b> Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla. ....	70
<b>Figura 3-18.</b> Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas. ....	72
<b>Figura 3-19.</b> Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla. ....	73
<b>Figura 3-20.</b> Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas. ....	76
<b>Figura 3-21.</b> Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla. ....	77

## Lista de tablas

Pág.

<b>Tabla 1-1.</b> Propiedades físicas de algunas fibras naturales.....	25
<b>Tabla 1-2.</b> Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.....	25
<b>Tabla 1-3.</b> Propiedades físicas y térmicas del PP .....	28
<b>Tabla 1-4.</b> Propiedades mecánicas del PP.....	28
<b>Tabla 1-5.</b> Propiedades mecánicas de la guadua.....	40
<b>Tabla 2-1.</b> Nomenclatura de las combinaciones del MC.....	51
<b>Tabla 2-2.</b> Peso de cada material para las diferentes mezclas.....	51
<b>Tabla 2-3.</b> Cantidad de probetas a elaborar. ....	52
<b>Tabla 3-1.</b> Aleatorización de las probetas de Tensión y Flexión.....	62
<b>Tabla 3-2.</b> Módulos de elasticidad y desviación estándar.....	65
<b>Tabla 3-3.</b> Esfuerzo último a tensión y desviación estándar.....	68
<b>Tabla 3-4.</b> Esfuerzo último a flexión y desviación estándar. ....	72
<b>Tabla 3-5.</b> Módulo de elasticidad a flexión y varianza estándar.....	75



# Introducción

La ciencia y la ingeniería de los materiales viene evolucionando desde la antigüedad a medida que el hombre lo hace. Inicialmente, este estaba limitado a trabajar con materiales que solo encontraba en la naturaleza, pero luego, la aparición de metales como el hierro y el cobre permitieron la creación de componentes más resistentes y maleables bajo ciertas condiciones. Hoy día, la creación e investigación de nuevos materiales son una parte importante de la economía, puesto que no solo se obtienen nuevos materiales, sino que además se elabora la infraestructura necesaria para manufacturar mejores compuestos.

Pero no solo se pueden conseguir nuevos materiales, los MC por ejemplo, permiten tomar materiales ya existentes y unirlos a escalas micro o macroscópicas, logrando así elementos con características mejores que las de los componentes individuales del compuesto, por ello, no solo se estudia su estructura interna, además, se deben conocer las propiedades de cada material que se pretenda usar, o en caso tal, averiguar estas características. El transporte público de alta velocidad (High Speed Civil Transport en inglés) por ejemplo, requiere de materiales que resistan temperaturas de hasta 1800 °C [1]. El empleo de materiales con características mejoradas es un tema que avanza con gran rapidez.

Por ello es necesario avanzar a la par en la obtención y estudio de los componentes que se encuentran alrededor, para así, desarrollar mejoras, con el fin de optimizar procesos y en algunos casos reducir el uso de materiales que atenten contra el medio ambiente, tema que actualmente es de gran interés para el hombre, puesto que elementos que se crearon hace años, ahora representan una gran amenaza para el ambiente, caso tal es el del plástico, pues mucho del plástico producido se diseña para ser desechado luego de un solo uso.

Para el año 2015 la producción mundial de plástico fue de 400 millones de toneladas. De estas, solo el 9% es reciclado, un 12% se incinera y el 79% termina en vertederos que afectan el medio ambiente. Hoy día ya hay leyes que impiden emplear plásticos de un solo uso, pero esto no es suficiente, se requiere hacer algo más, por ello, en este trabajo, se tomó una pequeña parte de este plástico, en específico el PP, que es considerado un material que no atenta contra la salud humana, razón por la cual es usado en diferentes tipos de envases y tapas de alimentos, productos químicos y/o productos de aseo [2].

Para el estudio, se tomaron las tapas y se procesaron junto con materiales como la fibra de la guadua angustifolia, un material natural que presenta características mecánicas comparables con las del acero, y se adicionaron partículas de polvo de cerámica tenaz, se realizaron pruebas de tensión y flexión según normas ASTM 638D y ASTM 790D. Los resultados servirán para plantear posibles usos para el material en estudio.

Actualmente se adelantan múltiples estudios de MC de diferentes tipos de matrices y refuerzos, esto con el fin de desarrollar materiales con mejores características que los actuales pero que sean biodegradables, o que su resistencia mecánica se supere. Algunos de los proyectos que se han realizado de materiales compuestos con matriz polimérica, más exactamente polipropileno, son:

Caracterización de un material compuesto matriz termoestable reforzado con fibra de guadua [3], este material combinó resina de poliéster y las fibras de guadua en adiciones de 10%, 15% y 20%, con un proceso de des-lignificación con ácido acético y clorito de sodio, que garantizó una mejor adhesión matriz fibra. Se le realizaron pruebas mecánicas y se concluyó que el modelo con mejor módulo de elasticidad y resistencia fue del 15% de adición de fibra. Igualmente en Desarrollo de materiales compuestos de polipropileno y nanoestructuras de carbono [4], los materiales se mezclaron mediante fundido, lo cual dio como resultado una mejora en la estabilidad térmica y un aumento del 15% en el módulo de Young.

Otro estudio de material compuesto con matriz polimérica de PP que presentó grandes resultados en los ensayos mecánicos, fue uno realizado con fibra de cedro, que se mecanizó por inyección, se notó un aumento de 20.3% a tensión de un y 46.2% a flexión, [5].



Hurtado et al. [6], adicionaron nano arcillas en concentraciones del 3%, 5% y 7% por medio de extrusora de doble usillo, las propiedades mecánicas aumentaron de la siguiente manera, 4% resistencia a la tracción, 40% resistencia a la flexión, 59% modulo elástico y 57% módulo de flexión.

Por otro lado, en Estudio del proceso de fabricación de composites de polipropileno reforzados con fibras continuas [7], se creó un material laminado a alta presión con una resistencia a flexión de 251 MPa y un módulo de flexión de 13900 MPa según los efectos de los ensayos, valores mayores que los resultados obtenidos de elaborar lámina mediante el proceso de compresión.

Tres proyectos consultados: Desarrollo de un material compuesto plástico (PP)-madera (ASERRIN) usando materias primas de reúso [8], Obtención y evaluación de mezclas de polipropileno con fibras de raquis de banano (Musa AAA) [9] y Aplicación de residuos de cascara de huevo como alternativa de Biorelleno en compuestos de polipropileno [10], no obtuvieron resultados convenientes, en el primer caso, el material fue extruido y sus propiedades mecánicas disminuyeron mientras que para el segundo, las pruebas mecánicas quedaron pendientes. Para el tercer caso, se realizó nuevamente el desarrollo del material sin adiciones químicas a la cascara de huevo, sin conocerse si las propiedades mecánicas sufren algún cambio positivo o negativo.

El alcance de este proyecto es estudiar las propiedades mecánicas de tensión y flexión de un MC con matriz de PP y refuerzo de fibra de guadua y polvo de cerámica tenaz, frente a las del PP al 100%.

El **objetivo general** del presente proyecto es “Estudiar las propiedades mecánicas de un MC con matriz de PP, con refuerzo de fibra de guadua y polvo de cerámica tenaz, y compararlas con las del PP al 100%, para determinar si hay una mejora en sus características”. Este objetivo que logra a través de: 1) “Obtener las probetas de 100% PP reciclado y de las diferentes combinaciones del MC”, 2) “Realizar los ensayos mecánicos de las probetas obtenidas de 100% PP reciclado y de las combinaciones de MC” y 3) “Analizar los datos numéricos para determinar el comportamiento mecánico del PP reciclado y de los MC”.



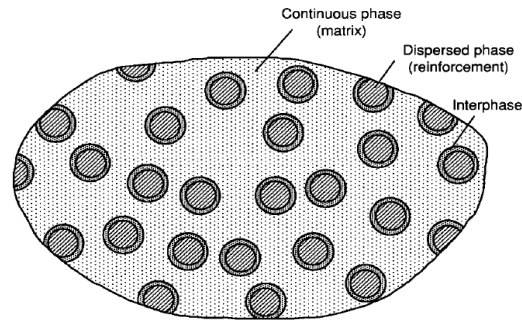
# 1. Capítulo: Generalidades

En este capítulo se dan a conocer los conceptos y estado del arte, involucrados con el tema desarrollado en ésta investigación.

## 1.1 Materiales compuestos

Se define como material compuesto (MC), a todo sistema o combinación macroscópica de dos o más elementos unidos no disueltos y visibles entre sí, esto con el fin de obtener un nuevo compuesto que pueda tener mejores características que las de los materiales que lo componen. Gracias a las múltiples mezclas que se pueden lograr, los MC son muy usados en las áreas de aviación, aeronáutica y electrónica, entre otras, puesto que son materiales con una relación resistencia y rigidez-peso, ideal, para ser usados en estos campos, es decir, sus características mecánicas suelen ser iguales o superiores a las de muchos metales, pero su densidad es mucho más baja, obteniendo materiales livianos. Sin embargo, así como hay MC con buenas características los hay con desventajas notables como su fragilidad y tenacidad, pero si se consigue una buena aleación, son inconvenientes que se pueden llegar a solucionar [1].

Actualmente hay gran variedad de MC en los productos que a diario se usan, desde equipos deportivos como raquetas de Tenis y palos de golf o jockey, hasta medios de transporte como las bicicletas o las aspas de un motor de aviación; también en las diferentes industrias, en el uso de procesamiento de alimentos, minería, electrónica, entre otras [11]. Todo esto es posible por las múltiples combinaciones de MC que se pueden realizar, por ello, su clasificación aunque podría ser extensa se basa en dos componentes principales que se pueden observar en la **Figura 1-1**, la matriz o fase continua y el refuerzo o fase discontinua.

**Figura 1-1.** Fases de un material compuesto.

Fuente: Isaac M. Daniel, 2006

### 1.1.1 La matriz

Es la fase más grande en cuanto a proporción, suele ser más blanda y dúctil, esta es de tipo polimérica, cerámica o metálica, sus principales funciones consisten en definir las propiedades físicas y químicas, transferir las cargas al refuerzo, preservar, y brindar unión con los materiales de refuerzo. Mecánicamente la matriz es la que soporta el esfuerzo bajo cargas de compresión y tracción, esta transfiere la carga al refuerzo ya sea de tipo particulado o en fibras [12], cómo se muestra en la **Figura 1-2**.

**Figura 1-2.** Soporte de cargas de la matriz

Fuente: Materiales-compuestos, 2009.

Según el tipo de matriz los MC se clasifican en: [13]

- ✓ **Matriz polimérica:** (PMC Plastic Matrix Composites) es el tipo de matriz más común, se puede decir que este tipo de matriz presenta varios pros y contras al momento de usarla. Dentro de sus contras cabe mencionar la baja resistencia mecánica, baja densidad y el efecto que pueden tener en el entorno ambiental

(humedad, temperatura, radiación solar), dentro de sus pros se puede mencionar, bajo costo, alta resistencia a la corrosión y facilidad de moldeo. Todo esto puede variar según el material que se esté trabajando.

Según su comportamiento se pueden clasificar en dos grandes grupos, el primero son los termoplásticos, que son polímeros que al someterse a ciertas temperaturas se tornan más fluidos, permitiendo una mejor maleabilidad que queda intacta al enfriarse, son los de mayor uso comercial; algunos tipos son: polietilenos, poliamidas (nylon), polietercetonas (PEEK), cloruro de polivinilo (PVC), entre otros.

El segundo grupo son los termoestables, son resinas de mucha rigidez que al someterlos a temperaturas elevadas se promueve su descomposición química al punto de carbonización; estos pueden ser: poliésteres, epóxicos, fenólicos, polimidas (PI), ésteres de vinilo y siliconas.

Los PMC más comunes son: poliéster-vidrio, epoxi-vidrio, polimida-vidrio, epoxi-carbón, PEEK-carbón, entre otros [13].

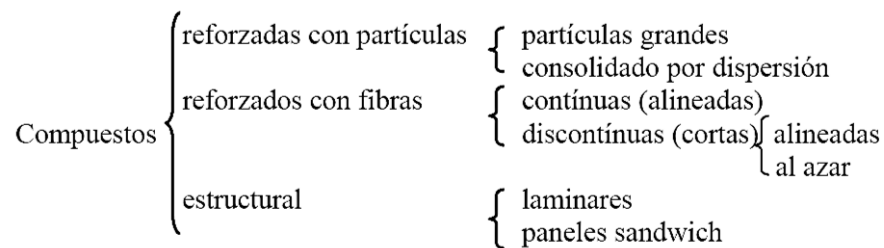
- ✓ **Matriz cerámica:** (CMC Ceramic Matrix Composites) son los de uso más reciente, la idea principal es aprovechar su alta resistencia térmica, mientras se mejora su resistencia mecánica y tenacidad. Son usados principalmente en aisladores eléctricos y/o térmicos, debido a que en temperaturas elevadas son más resistentes que los metales y los polímeros, puesto que la cerámica se considera dura y frágil. Los CMC incluyen; Carbón-carbón (C-C), carburo de silicio-carburo de silicio (SiC-SiC), Aluminosilicato de calcio (SiC-CAS) [11].
- ✓ **Matriz metálica:** (MMC Metal Matrix Composites) este tipo de refuerzo ofrece una alta resistencia, rigidez, tenacidad y conductividad eléctrica y térmica, no obstante, es limitada por su dificultad en el proceso de mecanizado. Se manejan tres tipos; Aluminio, Titanio y Cobre, su uso está en función de la temperatura de fusión, debido a que los metales se consideran resistentes pero deformables, son más usados en aplicaciones estructurales, aeroespaciales y motrices. Algunos ejemplos de MMC incluyen Al-SiC (Carburo de silicio), Ti-SiC, Al-B, Al-C, Al-Grafito [1].

### 1.1.2 Material de refuerzo

Es otra forma de clasificación de los MC, esta también se denomina fase discontinua o dispersa y es la encargada de conferirle a la matriz propiedades que esta no posee, como aumentar su resistencia, rigidez, comportamiento a altas temperaturas o a la abrasión, etc. [13].

Este puede ser en forma de partículas o fibras, como se puede ver en la **Figura 1-3**, lo importante de esta combinación es que sea homogénea al igual que la distribución dentro de la matriz, el tamaño es un factor importante puesto que entre más pequeño sea, será más efectivo.

**Figura 1-3.** Tipos de materiales compuestos.



Fuente: E Donoso C, 2007

#### ✓ MC reforzado con partículas

Habitualmente se suelen usar partículas para obtener materiales más resistentes, pues estas resultan siendo más resistentes y duras que la matriz con la que se pretende mezclar, por ende mejoran considerablemente las propiedades mecánicas. Según el tamaño de la partícula se diferencian dos tipos de composites particulados: los **Composites reforzados por dispersión**, en el cual se usan partículas de tamaño por el orden menor de los 100 nm, en lo posible dispersas homogéneamente a través de la matriz. Debido a su tamaño estas actúan a nivel atómico-molecular, aumentando la dureza y la resistencia a la deformación plástica y tracción. Este tipo de refuerzo se usa comúnmente en metales y aleaciones metálicas [14]; y los **MC reforzados con partículas grandes**, partículas de un tamaño mayor a  $1\mu$ , también llamados composites aglomerados o verdaderamente particulados, las partículas pueden llegar a tener diferentes geometrías, pero, por lo

general siempre presentan la misma dimensión, el refuerzo resulta ser más efectivo entre más pequeñas sean las partículas y mejor distribuidas se encuentren en la matriz. Debido a que sus partículas son tan pequeñas, la interacción con la matriz se genera a nivel macroscópico, la efectividad del refuerzo dependerá de la cohesión de este con la matriz.

Comúnmente para este tipo de composites se usan matrices metálicas o poliméricas, con refuerzo de partículas de cerámica. Para este tipo de compuestos la regla de mezclas establece el módulo elástico entre un máximo dado por la **Ecuación 1** y un mínimo dado por la **Ecuación 2**.

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad \text{Ecuación 1}$$

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde E y V representan el módulo elástico y la fracción de volumen, mientras que los subíndices m, p y c representan la matriz, la fase-partícula y el material compuesto respectivamente [15].

Dentro de los principales MC por partículas se encuentran tres tipos, el **hormigón** que es un compuesto formado por material particulado de cerámica, este tiene dos tipos, el hormigón pretensado y el hormigón postensado, que resultan de alta calidad y menos agrietamiento y fluencia, por ende su uso está mayormente dado en carreteras y puentes. [16].

Otro material formado con partículas es el asfalto, que es un betún o alquitrán formado del refinamiento del petróleo o de la roca asfáltica [17], y por último están los cermets, que son compuestos de metal-cerámica, el más común es el formado por carburo cementado [18].

### ✓ **MC reforzados con fibras**

Este tipo de refuerzo es el más antiguo y usado al momento de formar materiales con una elevada resistencia y rigidez mecánicas a temperaturas, o muy altas o muy bajas, los factores fundamentales para la creación de este tipo de material son: longitud/diámetro, orientación, propiedades de las fibras y matriz, además de la conexión entre estas [19]. El factor **Longitud/diámetro**, se debe a la estrecha relación entre el diámetro y la longitud de

la fibra, esta permite obtener un mejor resultado en cuanto a propiedades mecánicas, la relación entre estos dos factores debe ser muy alta y es recomendable el uso de fibras largas alineadas, puesto que la carga aplicada se verá reflejada en el centro de la fibra y no en los extremos, lo que indicará que carga será transmitida a la matriz. El diámetro de la matriz es importante porque este es el encargado de disminuir el número de defectos e impedir su propagación [15].

Existe una longitud crítica  $l_c$ , ver **Ecuación 3**, para aumentar la resistencia y rigidez de los MC, esta depende de variables como el diámetro de la fibra ( $d$ ), resistencia a la tracción ( $\sigma_f$ ) y resistencia a la cizalladura de la matriz ( $\tau_c$ ):

$$l_c = \frac{\sigma_f * d}{\tau_c} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para lograr un buen reforzamiento, se recomienda que la longitud  $l$  de la fibra sea mayor que la longitud crítica  $l_c$ , normalmente  $l \gg 15l_c$ . Aquellas que cumplen este criterio son denominadas fibras continuas, las que no, son discontinuas o cortas. En este tipo de fibras el esfuerzo y el reforzamiento son apenas perceptibles, por ende, se recomienda más el uso de fibras continuas [12].

Otro factor es la **Concentración y Orientación de la fibra**, el primero indica que esta no debe exceder el 80% en volumen, puesto que la matriz no las rodearía completamente, en cuanto a su orientación se aprecian dos circunstancias, alineadas paralelamente a la carga que se va a aplicar y alineación al azar. Las propiedades del MC mejoran con la distribución uniforme de la fibra [14].

Los **MC con fibras continuas alineadas**, permiten que la carga soportada total  $F_c$ , ver **Ecuación 4**, sea igual tanto en la fase matriz  $F_m$ , como en la fase fibra  $F_f$ . Ver **Figura 1-4 (a)**.

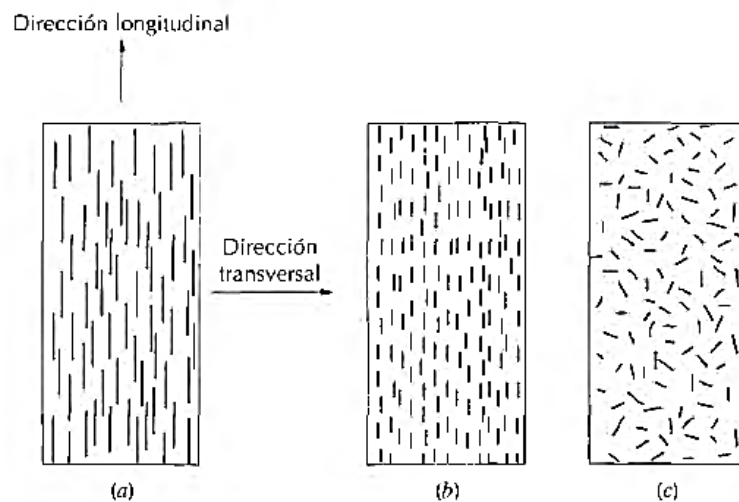
$$F_c = F_m + F_f \quad \text{Ecuación 4}$$

Por otro lado los **MC con fibras discontinuas y alineadas**, presentan una elasticidad y resistencia a la tracción que aumenta entre un 90% y 150% con respecto al material de fibras continuas. Dentro de las fibras cortas más usadas están las de vidrio, carbono y



aramida. **Ver Figura 1-4 (b)**. Por último, están los **MC con fibras discontinuas y orientadas al azar**, este tipo de fibra se usa en aplicaciones en las que los esfuerzos son multidireccionales, pero su eficiencia en el reforzamiento no es la mejor, sin embargo, sus propiedades mecánicas son isotrópicas, es decir que sus propiedades son iguales en cualquier dirección. Algunas ventajas de este tipo de composites son, su bajo costo en la fabricación y sus rápidas velocidades de producción. Algunos de los métodos de obtención son el moldeo por compresión, por inyección y por extrusión. **Ver Figura 1-4 (c)**.

**Figura 1-4.** Orientación de las fibras



Fuente: Jr, 1995 [19]

El siguiente factor son las **Propiedades de las fibras**, el cual indica que, al usarlas en la elaboración de los MC, aspectos como su resistencia, ligereza y deformabilidad son factores importantes, así como la temperatura, debido a que, si el composite se va a usar a altas temperaturas, el punto de fusión de la fibra debe ser alto. Algunas fibras empleadas en la fabricación de los MC son **los Whiskers**, monocristales de diámetro muy pequeño, **los alambres** que poseen diámetros grandes, siendo de materiales como acero, wolframio o molibdeno y **Las Fibras**, que son los materiales más usados y pueden ser cerámicas, metálicas o poliméricas [20].

Las **Propiedades de la matriz** la cual posee varias funciones, como, transmitir los esfuerzos aplicados a las fibras, por ende el esfuerzo que resiste la fase matriz es muy pequeño, este debe ser dúctil y el módulo elástico de la fibra debe ser mayor que el de la matriz, en segundo lugar la matriz tiene el papel de proteger la fibra del deterioro por

abrasión mecánica o reacciones químicas, y por último, la matriz separa las fibras lo que impide una propagación de las grietas [14]. Por último está la **Conexión fibra-matriz**, esta debe ser óptima para evitar el desgaste y garantizar una transferencia eficaz de las cargas aplicadas desde la matriz hacia las fibras, por lo general, las matrices poliméricas y metálicas presentan la mejor adherencia. Es importante además tener en cuenta que si la fibra y la matriz no presentan respuestas térmicas similares es decir expansión-contracción, se pueden romper los enlaces con facilidad [15].

Por lo general se usan tres tipos principales de fibras sintéticas para reforzar materiales plásticos, estas son: vidrio, aramida y carbono, cada una con características especiales según el tipo de aplicación que se requiera además de un proceso de obtención distinto [1]. **La fibra de vidrio**, por lo general se usa en la creación de compuestos estructurales o de moldeo, tiene características como alta resistencia al calor, frío, humedad y corrosión, buena relación resistencia peso, aislamiento eléctrico, facilidad de fabricación y costo bajo, los tipos de vidrio más importantes son el tipo **E** (eléctricos), y el tipo **S** (alta resistencia); el principal uso de este tipo de fibras está en las carrocerías de los automóviles, suelos industriales, industria aeroespacial y militar, entre otras [18], la producción de este tipo de fibras se realiza extrayendo monofilamentos de vidrio en un horno con vidrio fundido.

Las **fibras de carbono**, se caracterizan por ser resistentes, tener baja densidad, elevada rigidez, resistir mejor la corrosión y tolerar temperaturas altas, El uso principal de estas fibras está en la industria aeronáutica y automovilística, con el fin de reducir peso en algunos de sus componentes estructurales [19]. Por último, están las **fibras de aramida**, son de baja densidad y alta resistencia a la tensión y rigidez [19].

Actualmente, el uso de fibras naturales para la fabricación de materiales compuestos está tomando más fuerza, esto por ser económicas y tener menos impacto ambiental, lo que las hace excelentes para aplicaciones amigables con el medio ambiente. Muchos polímeros son reforzados con fibras de coco, lino, cáñamo y yute, entre otras. Estas fibras poseen ventajas como baja densidad, elevada rigidez, diferentes composiciones y propiedades físicas que son de gran influencia para la matriz de refuerzo [21].

En la **Tabla 1-1** y **Tabla 1-2** se pueden ver las propiedades físicas y mecánicas de algunas de las fibras naturales más usadas:

**Tabla 1-1.** Propiedades físicas de algunas fibras naturales

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Humedad (%)
<b>Cáñamo</b>	1.48	88-90	7-10	1.5-2.0	3.5-8
<b>Sisal</b>	1.45	65	12	9.9	10
<b>Plátano</b>	1.35	63-64	19	5	10-11
<b>Piña</b>	1.53	81	-	12.7	13.5

Fuente: Varios. José E. Crespo Amorós et al., 2015.

**Tabla 1-2.** Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Diámetro (μm)	Longitud (mm)	Elongación a la rotura (%)	Resistencia a la rotura (Mpa)	Módulo de Young (GPa)	Modulo especifico
<b>Lino</b>	1380- 1500	40-600	10-65	1.2-3	343-1500	60-80	26-46
<b>Cáñamo</b>	1350- 1480	10-51	5-55	1.6-4.5	580-1110	70	47
<b>Kenaf núcleo</b>	310	0.4-1.1	0.4-1.1	-	-	-	-
<b>Kenaf exterior</b>	1200	1.4-11	1.4-1.1	2.7-6.9	295-930	-	-
<b>Yute</b>	1460	0.8-6	0.8-6	1.5-3.1	187-773	10-30	7-21
<b>Ramio</b>	1440- 1550	40-250	4.-250	2-4	400-938	61.4- 128	27-47

Fuente: Varios. José E. Crespo Amorós et al., 2015.

### ✓ MC estructural

Este tipo de materiales se forman a partir de materiales homogéneos y compuestos, por ende, sus características se pueden mejorar no solo por sus componentes sino además por la geometría del diseño de estos [14]. Los principales tipos de estos materiales son, los **Materiales laminares** hechos con láminas o paneles con una dirección conveniente para elevar la resistencia, son

materiales ligeros y de bajo costo, diseñados principalmente para resistir la abrasión y la corrosión.

Por último, están los **Paneles sándwich**, son materiales que constan de dos laminas externas resistentes, separadas por un material menos denso y resistente llamado núcleo el cual suele ser de baja rigidez y resistencia. Este tipo de materiales, aunque son menos sofisticados, son también usados en techos suelos y tabiques.

### **1.1.3 Procesos de conformación de MC reforzado con fibras**

Para conformar este tipo de materiales se usan principalmente procesos como la pultrusión, pre-impregnación y bobinado de filamentos [14].

El primero se usa para obtener piezas de forma alargada y sección transversal constante, ya sean perfiles estructurales, vigas, canales, conductos o tuberías [1]; en el proceso de pre-impregnado las fibras continuas son impregnadas previamente con una resina polimérica parcialmente curada [19] y por último el bobinado de filamentos, en el cual las fibras pasan por un baño de resina que se puede aplicar durante el embobinado o luego de este [1].

Los composites con matriz metálica reforzados con fibras continuas son un poco más difíciles de obtener que aquellos de matriz polimérica, en este tipo de materiales se suelen usar métodos como la capilaridad, la presión o el vacío [11].

Un nuevo tipo de material reforzado por fibras es el llamado híbrido. Para obtener este material se usan dos clases diferentes de fibras con una sola matriz, ofreciendo una mejor combinación de propiedades. La combinación más usada es la de fibras de carbono y vidrio en una matriz polimérica, dando como resultado un material más fuerte, tenaz, resistente al impacto y más barato de fabricar que los plásticos reforzados con solo vidrio o solo carbono. Este tipo de compuesto es usado en componentes de baja densidad como en el transporte aéreo, marítimo y terrestre, además en elementos deportivos y ortopédicos [19].

## 1.2 Polipropileno (PP)

Se considera el tercer polímero termoplástico producido desde 1957, se convirtió en uno de los plásticos de mayor producción en estados unidos, se llegó a una cifra de más o menos 1000 millones de lb en 1969. Este material tiene diferentes aplicaciones en distintos campos, desde fabricar paragolpes de un auto, pasando por tuberías, juguetes, cajas, hasta envases que contengan diferentes líquidos y/o alimentos [22].

### 1.2.1 Propiedades del PP

El PP se caracteriza por ser el más ligero entre todos los plásticos, su densidad es de  $0.905 \text{ g/cm}^3$ , su alta cristalinidad añade una elevada resistencia a la tracción, rigidez y dureza [23]. Su buena relación resistencia peso lo hace un material idóneo para múltiples aplicaciones.

Posee buena resistencia química, inercia química y biológica, excelente estabilidad térmica, fácil procesamiento y es apto para ser reciclado. En cuanto a la temperatura cabe mencionar que tiene alta estabilidad térmica pero baja tenacidad a la fractura a bajas temperaturas y con condiciones de impacto. Además conserva su alta resistencia a la tracción, es moldeable y puede ser esterilizado aplicando altas temperaturas [24].

Este además posee muy buenas propiedades eléctricas, pero su comportamiento es inestable al calor, luz o agentes oxidantes, por ello se hace necesario que en su procesamiento se estabilice con antioxidantes y absorbentes de luz ultravioleta [23].

### 1.2.2 Tipos de PP

Se tienen tres tipos de PP [23], los **Homopolímeros** que son muy cristalinos, se usan en artículos con características de alta rigidez, dureza y resistencia a la deformación por calor. Los **Copolímeros**, los cuales están formados en bloque de etileno-propileno con alta resistencia al impacto ya sea a temperatura ambiente o a baja temperatura, su resistencia va desde moderada a muy alta. Por último, están los **Copolímeros**

**Random**, que tienen un menor grado de cristalinidad por ello su nivel de fundición es más extenso, resistiendo más los impactos a temperatura ambiente.

A continuación, en las **Tablas 1-3** y **1-4** se pueden ver las diferentes propiedades físicas, térmicas y mecánicas [25].

**Tabla 1-3.** Propiedades físicas y térmicas del PP

Propiedades físicas	PP Copolímeros		PP Homopolímeros		Comentarios
	Métrico	Ingles	Métrico	Ingles	
<b>Gravedad específica</b>	0.9 g/cc	0.0325 lb/in <sup>2</sup>	0.91 g/cc	0.0329 lb/in <sup>2</sup>	ASTM D792
<b>Absorción de agua</b>	Max 0.01%	Max 0.01%	Max 0.01%	Max 0.01%	Inmersión 24hr, ASTM D570(2)
<b>Absorción de agua a saturación</b>	Max 0.01%	Max 0.01%	Max 0.01%	Max 0.01%	Inmersión 24hr, ASTM D570(2)
Propiedades térmicas	PP Copolímeros		PP Homopolímeros		Comentarios
	Métrico	Ingles	Métrico	Ingles	
<b>Punto de fusión</b>	153 °C	305 °F	164 °C	327 °F	Cristalino Peak; ASTM D3418
<b>Temperatura máxima de servicio, Aire</b>	82.2 °C	180 °F	82.2 °C	180 °F	Largo plazo
<b>Deflexión de la temperatura a 1.8 Mpa (264psi)</b>	100 °C	212 °F	95.9 °C	210 °F	ASTM D648
<b>Inflamabilidad, UL94 (clasificación estimada)</b>	HB	HB	HB	HB	1/8 pulgadas

Fuente: «Polipropileno», s. f. [26]

**Tabla 1-4.** Propiedades mecánicas del PP

Propiedades mecánicas	PP Copolímeros		PP Homopolímeros		Comentarios
	Métrico	Ingles	Métrico	Ingles	
<b>Dureza, shore D</b>	72	72	78	78	ASTM D2240

<b>Resistencia a la tracción</b>		23.4 Mpa	3400 psi	33.1 MPa	4800 psi	ASTM D638
<b>Alargamiento a rotura</b>		11%	11 %	14%	14%	ASTM D638
<b>Módulo de tracción</b>		1.05 GPa	152 ksi	1.31 GPa	152 ksi	ASTM D638
<b>Módulo de flexión</b>		1.24 GPa	180 ksi	1.34 GPa	195 ksi	ASTM D90
<b>Resistencia a la flexión</b>		33.1 Mpa	4800 psi	33.1 MPa	4800 psi	ASTM D90
<b>Fuerza de compresión</b>		1.21 GPa	4800 psi	34.5 Mpa	5000 psi	10% DEF 73°F; ASTM D695
<b>Módulo de compresión</b>		0.24	175 ksi	1.38 GPa	200 ksi	ASTM D695
<b>Coefficiente de fricción</b>		0.24	0.24	0.25	0.25	Seco vs Acero QTM55007
<b>Impacto izod, con muesca</b>		4.27 J/cm	8 ft-lb/in	0.64 J/cm	1.2ft-lb/in	ASTM D256 Tipo A

Fuente: «Polipropileno», s. f.

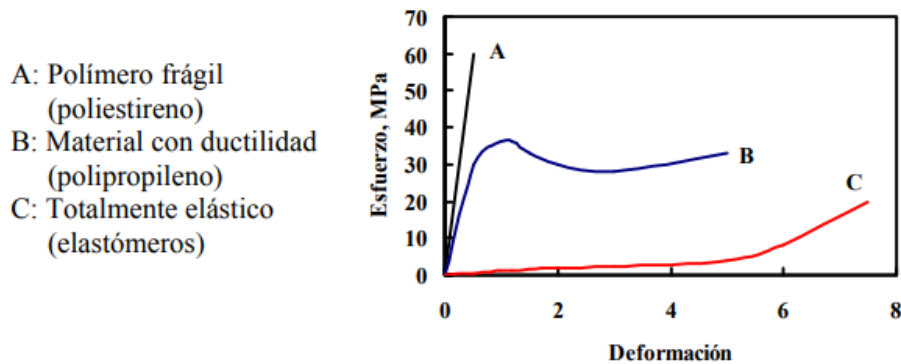
El PP es considerado un plástico ecológico y por ende es recomendado para estar en contacto con alimentos y elementos de cocina por su inocuidad, dentro de sus características se pueden encontrar las siguientes: [22]

- ✓ No contiene BPA (bisfenol A) ni Ftalatos
- ✓ Es totalmente impermeable
- ✓ Resistente a la corrosión, tanto de ácidos como de alcalinos
- ✓ Resiste temperaturas elevadas, admitiendo incluso esterilización a 140°C, por lo que es usado en artículos sanitarios
- ✓ Resiste los cambios bruscos de temperatura sin que su estructura molecular sufra algún cambio.

Aunque el PP es considerado uno de los plásticos más seguros [27], se reconoce que este tipo de material se degrada ocasionando que todo producto y/o alimento se infecte con sus partículas [28] pero esto no representa mayor riesgo al compararlo con el resto de los plásticos [29].

Los polímeros tienen tres formas de comportamiento a esfuerzo-deformación [30], las cuáles suelen ser frágil, dúctil y totalmente elástico. En la **Figura 1-5** se puede ver como es este comportamiento en los diferentes plásticos:

**Figura 1-5.** Comportamiento mecánico de los plásticos



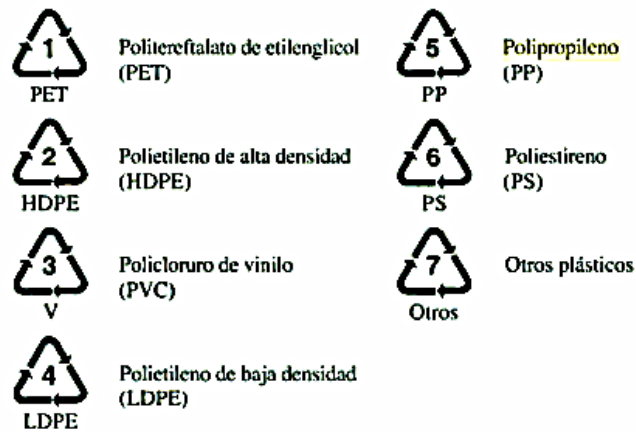
Fuente: «Material Docente», 2007

Como se puede evidenciar el PP presenta un comportamiento dúctil lo que lo hace un material maleable pero con buena dureza.

### 1.2.3 Identificación del PP

La manera de identificar si un envase o producto de plástico está hecho o no con PP, es por medio de los símbolos que se encuentran en estos envases. Este código fue designado por la Society for plastics en 1988, para hacer más fácil el proceso de reciclaje [31], ver **Figura 1-6**, según el tipo de plástico por el que está compuesto se distinguen los siguientes símbolos:



**Figura 1-6.** Códigos para identificar los plásticos

Fuente: APQUA, 1995

Para el caso específico del material que se está usando, el PP se puede ver en la **Figura 1-7**:

**Figura 1-7.** Identificación del PP

Fuente: APQUA, 1995

## 1.2.4 Técnicas de conformación del PP

Para el moldeo de plásticos hay múltiples técnicas según el producto final deseado [1], dentro de estas están:

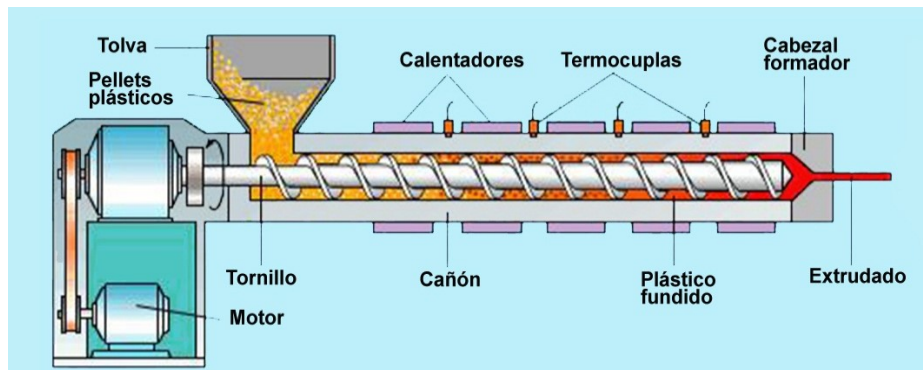
El moldeo por **inyección**, en el cual se coloca el compuesto en medio de las piezas superior e inferior, estas se calientan, pero solo una se desplaza, cuando el molde se cierra, el calor y presión hacen que el polímero adquiera la forma del molde [1], en el moldeo por **transferencia** los componentes se funden en una cámara de transferencia

calentada, el polímero derretido se inyecta dentro del molde aplicando una presión que garantice que se distribuya uniformemente [11].

El moldeo por **inyección** es una técnica muy usada para formar materiales termoplásticos, en este proceso el material baja desde una tolva vaciándose hacia un cilindro por el movimiento del émbolo [1], el método por **soplado** es parecido al moldeo de las botellas de vidrio [19].

Por último, está el moldeo por **extrusión** el cual es similar el de inyección, consta de un tornillo mecánico, que impulsa el material granulado por una cámara de fundición, la extrusión se genera al expulsar el material a través de un orificio de la matriz, ver **Figura 1-8**. El enfriamiento del material se puede realizar con aire o agua antes de ponerlo sobre un transportador. Esta técnica se usa para conformado de piezas con sección transversal constante [11].

**Figura 1-8.** Moldeo por extrusión



Fuente: William F Smith, 2006

### 1.2.5 Reciclaje del PP

Actualmente, el reciclaje de tapas es una iniciativa en la que se obtiene un beneficio mutuo que ayuda no solo a las empresas, sino además, a niños enfermos de cáncer o animales sin hogar [33]. Existen normas las cuales indican que en el hogar y en establecimientos públicos y privados, se debe realizar una correcta separación de residuos, se deben poner canecas o bolsas identificando el tipo de material que allí se debe depositar y así se facilita el trabajo de separación de plásticos, vidrios cartón, etc. [34].

En la **Figura 1-9** se evidencia el color con el cuál se deben identificar las canecas y/o bolsas para la correcta disposición de residuos:

**Figura 1-9.** Colores para la identificación de residuos



Fuente: Voodoo, 2019

### 1.3 *Guadua angustifolia* Kunth

Fue identificada originalmente por los botánicos Humboldt y Bonpland como bambusa guadua, luego, el término guadua fue descrito por el botánico alemán Karl Sigmond Kunth en 1822, usando el mismo término que los nativos indígenas de Colombia y Ecuador. Constituye el género de bambú nativo más importante de América, es endémica de allí y cuenta con más de 30 especies distribuidas entre México y Argentina, algunos tipos se pueden ver en la **Figura 1-10**.

**Figura 1-10.** Tipos de bambú



Fuente: Longhi, 1998

Es considerada el tercer bambú más grande del mundo [37] y se conoce también como el oro verde del siglo XXI. La *Guadua angustifolia* es la especie nativa más importante de Colombia, se desarrolla de manera óptima en la región central de los andes y presenta grandes características como ser auto sostenible, de rápido crecimiento, produce más oxígeno y captura más CO<sub>2</sub> que cualquier otra planta. Mundialmente es una especie de gran uso por su fuerza y durabilidad, por ende, es usada en construcción de estructuras y posee gran potencial para la fabricación de materiales compuestos; lamentablemente ha sido destruida en Venezuela y varios países de América central menos en Colombia, el único país que ha preservado la mayor parte de sus especies gigantes [38].

Los bosques de *Guadua* son llamados *guadales*, ver **Figura 1-11** y actualmente en Colombia se reconocen las siguientes variedades y biotipos de *Guadua* [39]:

- ✓ ***Guadua angustifolia* Kunth:** Es la más usada en construcción, su diámetro esta entre los 9 y 12 cm con una altura de 18 a 24 m y llegando a crecer hasta 12 cm por día.
- ✓ ***Guadua amplexifolia*:** se encuentra en el oriente de Colombia su altura no supera los 12 m.
- ✓ ***Guadua bicolor* Londoño y *nigra* Londoño:** estos dos tipos de *Guadua* se identifican por tener rayas de color amarillo para el caso de la bicolor, o verde oscuro para la nigra. Son endémicas de Colombia, más exactamente de la región del Quindío. Son usadas en artesanías o como planta ornamental.
- ✓ ***Guadua rayada verde*:** Se encuentra al borde de la extinción, se usa en el área de la construcción su diámetro esta entre los 10 a 11 cm y su altura entre 15 a 18 m.
- ✓ ***Guadua* biotipo *macana*:** Este tipo de *Guadua* posee entrenudos más juntos lo que permite que resista más compresión, es considerada una de las mejores especies por su durabilidad y resistencia, por ello es muy usada en el área de la construcción. Su diámetro varía entre los 10 y 14 cm llegando a una altura de 18 a 23 m.
- ✓ ***Guadua* biotipo *castilla*:** Presenta baja resistencia a la compresión por ello se usa en la elaboración de esterillas para paredes, suelos, techos y materiales compuestos. Se considera la especie más grande con diámetros de 25 cm y una altura de 30 m.

- ✓ **Guadua biotipo cebolla:** Es más eficiente a la tracción por ello es usado en la fabricación de tablas tejidas. Sus diámetros son de 10 cm y su altura de 17 m.
- ✓ **Guadua biotipo cotuda:** presenta curvaturas en sus entrenudos, es usada esencialmente en artesanías y fabricación de muebles.

**Figura 1-11.** Guadales en el centro nacional del bambú Colombia

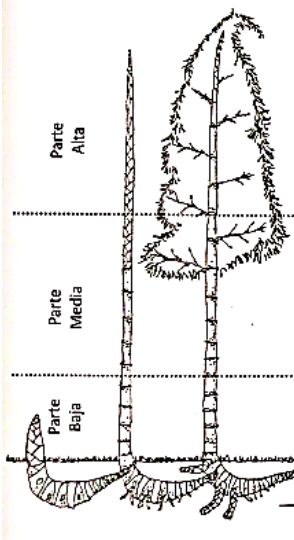


Fuente: Yebra, 2014

### 1.3.1 Usos e impacto de la guadua

Sus favorables características mecánicas, gran flexibilidad, rápido crecimiento, bajo costo y peso, hacen de este un material idóneo para la construcción. Según su edad se establecen usos específicos tal cómo se muestra en la **Figura 1-12**; en los primeros días el cogollo del bambú se usa de alimento humano, entre los 6 y 12 meses se pueden extraer cintas usadas en tejidos, con 2 años se pueden hacer esterillas y su edad ideal para la construcción es a los 3 o 5 años. Por lo general este es un material usado además en la elaboración de muebles y artesanías [37].

Figura 1-12. Usos de la guadua



USOS SEGÚN PARTE DE LA PLANTA		DESCRIPCIÓN	ALTURA	LONGITUD
Copa	Retorna al suelo como materia orgánica.	Parte apical de la planta	20 ml	1.20 - 2 ml
Varillón	Correas de estructura de techos y guías para cultivos transitorios.	Parte de la cepa con menor sección	18 ml	3 ml
Sobrebasa				
<hr/>				
Parte Media	Basa	En estructuras como viguetas para techos, andamios, columnas de estructuras de invernaderos para cultivos.	15 ml	4 ml
		Elaboración de esterillas, columnetas y vigas.	11 ml	8 ml
Parte Baja	Cepa	Columnas en obras civiles, Invernaderos y cercos	3 ml	3 ml
	Rizoma	Esculturas, muebles y juegos infantiles.	-2 ml	2 ml

USOS SEGÚN EDAD	30 días	1 año	2 años	3 a 4 años
	Alimento	Cestería	Esterillas, Cintas, Latas	Estructuras Civiles, Pisos, Laminados

Fuente: Gernot Minke, 2010

### 1.3.2. Impactos positivos al medio ambiente [38]

- ✓ **Producción de biomasa:** La producción de biomasa seca al año es más alta en comparación con la producida por el eucalipto, a partir de nuevos cultivos de la guadua angustifolia en el valle del cauca se producen 100 toneladas de biomasa por hectárea en 6 años.
- ✓ **Reducción de la erosión del suelo:** Dado que posee una amplia red de raíces ayuda a evitar la erosión por lluvias e inundaciones, ver **Figura 1-13**.

Figura 1-13. Raíz de guadua



Fuente: Salas Delgado, 2006

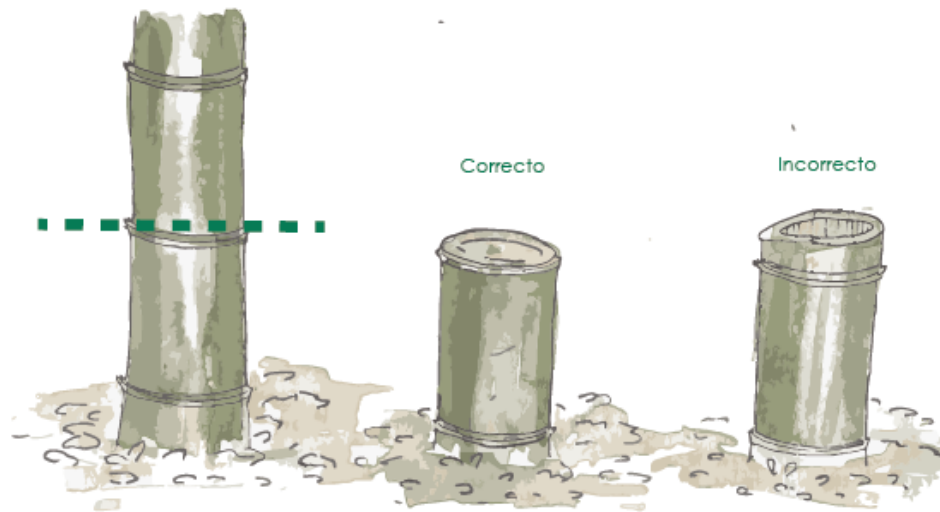
- ✓ **Retención de agua:** Un guadua de guadua angustifolia de una hectárea puede llegar a retener hasta 30.000 litros de agua.
- ✓ **Regulación del caudal hidráulico:** Como se mencionó anteriormente la guadua puede retener gran cantidad de agua lo que le permite tener un suministro suficiente de agua en época de sequía.
- ✓ **Reducción de temperatura:** Esto es posible debido a la evaporación del agua por medio de sus hojas.
- ✓ **Fijación del CO<sub>2</sub>:** Por su rápido crecimiento la guadua angustifolia Kunth es capaz de captar más CO<sub>2</sub> que un árbol, en los primeros 6 años de crecimiento logra llegar a captar 54 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea [38].

### 1.3.3 Características y procesado de la guadua

Esta planta crece hasta 12 cm por día, alcanzando al mes el 80% de su altura máxima, completándola a lo largo de 5 meses más. El proceso de lignificación ocurre entre los 4 y 6 años de crecimiento de las mismas, luego los haces vasculares se cierran y secan, por tanto, ya es útil para ser usada en la construcción. En la primera etapa de crecimiento, su humedad en la primera parte del tallo es del 80%, luego en los posteriores 4 y 6 años, cuando el tallo está duro, se reduce al 20% [39].

La guadua tiene gran cantidad de almidón por ello se hace necesario protegerla de los insectos, o cuando presenta humedad aparecen hongos y líquenes, que afecta el estado ideal para su uso, perjudicando así su durabilidad [37].

- ✓ **Corte:** Este se debe realizar con sierra o machete directamente por encima del primer o segundo nudo por arriba del suelo, debe ser un corte inclinado para así evitar la creación de un vaso que pueda almacenar el agua de lluvia puesto que puede pudrir el rizoma, cómo se ve en la **Figura 1-14**. Existen estudios que demuestran que la humedad, la hora y fase lunar al momento del corte tiene gran relación, por ello se aconseja cortar en luna menguante y en la madrugada, en este tiempo su humedad es menor. La edad adecuada de corte es entre los 3 y 5 años.

**Figura 1-14.** Corte de la Guadua

Fuente: Villegas, 2005

- ✓ **Secado:** Consiste en poner los cúmulos con hojas encima de unas piedras por un periodo de 4 semanas, así se secarán por efecto de la evaporación, pasado este tiempo se retiran las hojas y ramas y se pone a secar por más tiempo en un espacio cubierto y de buena ventilación. Existen 3 tipos de secado; con aire, que es el método más simple pues solo se exponen los tallos en forma de trípode al sol y al viento, este puede ser mejorado al encerrarlos en un invernadero y cubrirlos con plástico abriéndolo en horas de la noche, o poner los tallos de forma longitudinal con un agujero en uno de los extremos del tallo, para ingresar una manguera que trae aire caliente por medio de un ventilador desde un colector solar, cómo se muestra en la **Figura 1-15**. El secado por microondas, utiliza ondas electromagnéticas de alta frecuencia con el fin de evaporar la humedad de la caña; por último está el secado al calor, un método primitivo en el que las cañas se ponen de manera horizontal sobre fuego a una distancia prudente para que no se quemen y se van girando constantemente. Actualmente no es un método que se use por lo laborioso y porque las cañas pueden quebrarse.



**Figura 1-15.** Secado por aire en forma de trípode (izquierda) y por aire caliente (derecha).



Fuente: Gernot Minke, 2010

- ✓ **Curado:** El método más eficaz es el ahumado, método en el que los tallos se ingresan a un horno de ladrillo rustico, por una duración de 8 a 12 horas a fuego bajo. Este tipo de horno utiliza ramas y hojas como combustible, lo que genera gran cantidad de humo.
- ✓ **Limpieza de la superficie:** El método más efectivo y barato es usar agua a presión, por lo general se usa una hidrolavadora, ver **Figura 1-16**.

**Figura 1-16.** Limpieza superficie de la guadua



Fuente: Gernot Minke, 2010

- ✓ **Almacenamiento:** este debe almacenarse en un sitio con ventilación, seco y cubierto.

### 1.3.4 Comportamiento al fuego

Puesto que la guadua es hueca, ésta se quema rápido, así que las cañas son determinadas bajo la norma alemana DIN 4102, como inflamables que no producen fácilmente llama [39]. Adicionalmente, al bambú, para cambiar su tonalidad y darle color en varias matices, se le realiza un proceso de quemado, que, según lo investigado, se llegan a usar temperaturas entre los 60°C y los 900°C, esto depende del tipo de proceso y de si la llama es directa o no [42].

### 1.3.5 Propiedades físicas de la guadua

La guadua angustifolia Kunth posee una densidad de 715 kg/m<sup>3</sup>, un contenido de humedad de 7.1 % [43] y sus características mecánicas se pueden ver en la **Tabla 1-5**.

**Tabla 1-5.** Propiedades mecánicas de la guadua

Propiedades mecánicas	Promedio (MPa)	D:E (MPa)	C.V %
<b>Compresión paralela a la fibra</b>			
<b>Esfuerzo máximo</b>	48	3	5 %
<b>Esfuerzo en el límite proporcional</b>	36	2	6 %
<b>Módulo de elasticidad</b>	1913	1625	9 %
<b>Compresión perpendicular a la fibra</b>			
<b>Esfuerzo máximo radial</b>	5	0.6	12 %

<b>Esfuerzo tangencial</b>	<b>máximo</b>	6.8	0.9	21 %
<b>Tracción paralela a la fibra</b>				
<b>Esfuerzo máximo</b>		132	24.1	1 8%
<b>Módulo de elasticidad</b>	<b>de</b>	17468	3655	21 %
<b>Tracción perpendicular a la fibra</b>				
<b>Esfuerzo radial</b>	<b>máximo</b>	1.1	0.3	22 %
<b>Esfuerzo tangencial</b>	<b>máximo</b>	1.8	0.4	21 %
<b>Corte paralela a la fibra</b>				
<b>Esfuerzo máximo</b>		9.4	1.2	13 %
<b>Flexión</b>				
<b>Esfuerzo radial</b>	<b>máximo</b>	74	10.6	14 %
<b>Módulo de elasticidad radial</b>	<b>de</b>	9523	1100	12 %
<b>Esfuerzo tangencial</b>	<b>máximo</b>	87	12.8	15 %
<b>Módulo de elasticidad tangencial</b>	<b>de</b>	11456	1450	13 %

D.E= desviación estándar. C.V. = coeficiente de variación.

Fuente: López & Correal, 2009

A manera de contraste, una varilla de hierro de 1 cm<sup>2</sup> de sección, resiste una tracción de 40 kN y una guadua de sección de 12 cm<sup>2</sup> resiste una tracción de 216 kN, por ello es llamada el “acero verde” o “acero vegetal” [40].

Aunque la guadua posee muy buenas propiedades mecánicas, rápido crecimiento y es biodegradable, este es un material que aún no se considera como foco principal en el

estudio de la obtención de materiales compuestos, puesto que su uso es más dado al área de la arquitectura y fabricación de muebles, que al estudio del comportamiento de la fibra [44].

En Colombia se estima una producción al año de 30 millones de metros lineales de guadua, usados principalmente en construcción como material auxiliar, pero por el momento no existen cifras de su uso en la fabricación de viviendas, muebles y/o artesanías, puesto que es un mercado informal que no se encuentra regulado [45].

A partir del 2002, se empezaron a establecer una serie de normas colombianas con el fin de desarrollar una correcta metodología en las técnicas de clasificación del producto final [46].

## 1.4 Cerámica

Hasta hace algunos años, más acertadamente los años 60, las “cerámicas tradicionales” eran los únicos materiales que se conocían de este tipo, por ende, los más importantes y cuya materia prima es la arcilla. Algunos productos de este ejemplo de material son, la porcelana, los azulejos, vidrios, etc. Sin embargo, en los últimos tiempos el conocimiento de este tipo de materiales ha avanzado significativamente, como resultado de esto la cerámica evolucionó a una nueva generación destacándose actualmente en campos como la electrónica, informática, aeroespacial, entre otras [47].

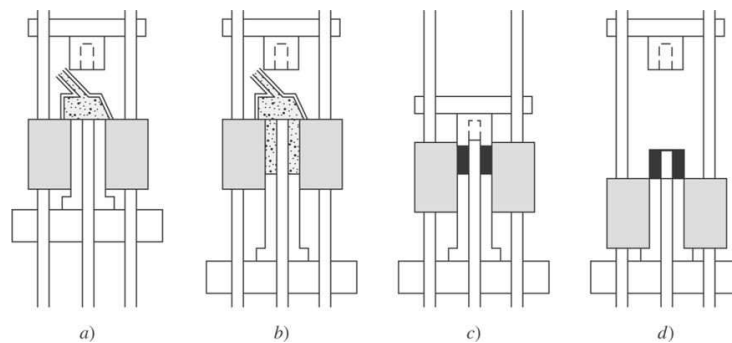
La cerámica es un material inorgánico no metálico, que consta de materiales metálicos y no metálicos vinculados entre sí por enlaces iónicos o covalentes. Sus propiedades varían ampliamente por la gran diferencia de sus uniones. Por lo general son materiales duros y frágiles, con tenacidad y ductilidad bajas, son buenos aislantes eléctricos y térmicos, debido a la falta de electrones de conducción, no se oxida, el agua no lo modifica, no es combustible, no es elástico y es refractario. Su mayor atractivo son sus temperaturas de fusión, pues por lo general suelen ser muy altas [19].

La cerámica por lo general posee tres elementos básicos para su constitución, que son, arcilla, sílice y feldespato, ejemplo de este tipo de cerámicas son los vidrios, ladrillo y azulejos, elementos usados en la construcción.

De la cerámica tenaz se pueden distinguir tres tipos, la porosa, elaborada con arcilla gruesa, áspera y permeable, con capacidad de absorción de humedad y que al romperse muestra una estructura terrosa. Un ejemplo de esta cerámica son tejas y ladrillos. Otro tipo es la cerámica compacta, una cerámica impermeable con una estructura monocristalina y de buena resistencia química, este tipo de cerámica se encuentra en las porcelanas y las losas finas. Por último, está la cerámica tenaz, elaborada con materiales inorgánicos, de granos finos cristalinos. Su producción se realiza a partir de la purificación de la materia prima ya sea natural o sintética, es un material con niveles altos de resistencia a la tensión mecánica y térmica, por lo general son usados en la fabricación de porcelanatos [48].

El conformado de este tipo de cerámica por lo general es por prensado cómo se ve en la **Figura 1-17**, con un contenido de agua de menos del 4% y una presión de 1.000 MPa, para partículas pequeñas. Al generar este tipo de presión, se obtienen materiales de mayor compactación y densidad en el producto final, disminuyendo su tiempo de cocción [19].

**Figura 1-17.** Prensado en seco de partículas cerámicas: a) y b) llenado, c) prensado y d) extracción.



Fuente: William F Smith, 2006

Una vez obtenida la baldosa, esta se pasa a decorar y esmaltar, finalmente pasa por un horno túnel para así asegurar el esmalte y realzar sus colores. Este proceso se llama bicocción. Los porcelanatos hacen parte de este proceso, pero se usa una mayor temperatura que la usada en los cerámicos convencionales, lo que genera una mayor cantidad de fase vítrea y permite que se puedan usar con y sin esmalte [48].

### 1.4.1 Propiedades mecánicas:

Por lo general los cerámicos no poseen buenas propiedades mecánicas, su mayor atractivo es la resistencia a altas temperaturas [49].

- ✓ **Elasticidad:** La mayoría de los cerámicos no sufren de deformación plástica a temperatura ambiente, sino que por el contrario presentan deformación plástica a altas temperaturas. La deformación se presenta hasta llegar a la fractura frágil como es llamada, y es una de sus características más críticas en aplicaciones estructurales.
- ✓ **Resistencia mecánica:** En este aspecto los cerámicos se consideran generalmente frágiles, hallar su comportamiento esfuerzo – deformación no es posible pues este tipo de prueba no está establecida debido a la dificultad de preparar y tomar la prueba, pues es difícil afianzar los materiales frágiles sin fracturarlos. La resistencia a la tensión puede variar entre -100 psi hasta los 106 psi, sin embargo, algunas cerámicas alcanzan resistencias a la tensión de 25.000 psi.
- ✓ **Tenacidad:** Por su enlace iónico y covalente los cerámicos presentan baja tenacidad, en los últimos años se han realizado mezclas para producir cerámicas de ingeniería con una tenacidad elevada.
- ✓ **Resistencia a la abrasión:** Esta está referida más que nada a la superficie de la pieza de cerámica, es decir al esmalte aplicado. Según la escala de dureza de Mohs, los esmaltes tienen una dureza de 6 y 7, equivalente a la de la porcelana.
- ✓ **Método de moldeado:** No se encuentra una norma que determine una mejora en la resistencia según el tipo de moldeado aplicado, por lo general aquellos realizados por torneado suelen ser más resistentes que aquellos formados por otros métodos.

### 1.4.2 Propiedades térmicas

Para la cerámica gres o tenaz se manejan las siguientes resistencias térmicas: [49]

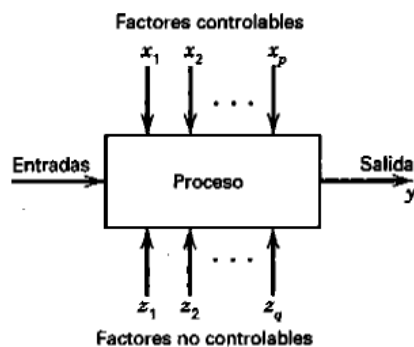
- ✓ **Resistencia térmica:** Es la resistencia que tiene el material al paso por calor, para la cerámica esta es buena desde que el calor no sea en forma violenta.

- ✓ **Resistencia al choque Térmico:** Es la resistencia que presenta un material a los cambios bruscos ya sea de calor a frío o viceversa, se determina por medio de la expansión térmica, es decir, la expansión del material por la elevación de la temperatura. En este caso, el diseño, forma y grosor de la pieza tienen relevancia en el comportamiento del material.
- ✓ **Resistencia a llama directa:** Es la resistencia de las piezas a la exposición a llama directa, en este caso particular, las hechas en barro son las más eficaces para este uso. Así como en el caso anterior, este también depende de su espesor, cuerpo poroso y forma. Sin embargo, el que este tipo de piezas resistan el fuego directo, necesariamente no significa que todas resistan al choque térmico.

## 1.5 Diseño y análisis de experimentos:

Este tipo de metodología se viene trabajando desde hace varios años aplicándose a diferentes ramas de investigación y la ciencia, lo que ha permitido crear nuevos procesos o mejorar los controles de calidad. En la actualidad el diseño de experimentos se considera una herramienta de vital importancia en la formación académica en todos los campos [50]. Se define como experimento al proceso en el cual se realizan múltiples pruebas haciendo cambios en las variables de entrada para así identificar las posibles variaciones o afectaciones que se puedan encontrar en la salida, esto con el fin de minimizar o controlar estos cambios [51], este tipo de procedimiento por lo general es aplicado a procesos y sistemas, como se puede observar en la **Figura 1-18**.

**Figura 1-18.** Modelo general de un proceso o sistema



Fuente: Douglas C. Montgomery, 2004

La realización de experimentos en los MC permite estudiar el comportamiento de los materiales en diferentes proporciones, esto con el fin de determinar que combinación es la mejor, presenta imperfecciones o simplemente determinar cierto tipo de características.

Para la realización de este tipo de experimentación se cuenta con tres pilares básicos; el primero de ellos es la realización de réplicas, es decir repetir el tanteo básico con el fin de obtener una estimación del error experimental, esto con el propósito de definir estadísticamente que tan diferente es, además de definir si los datos obtenidos son precisos. El segundo pilar es la Aleatorización, se considera el factor más importante y se basa en que el material a experimentar como el orden en que se deben realizar los ensayos sea al azar, esto con el fin de equilibrar las situaciones externas o no controlables que pueden interferir en la conclusión de la investigación. Por último, está la formación de bloques, el cual es un método muy usado con el fin de determinar la precisión de la prueba a realizar, esto se hace eliminando o disminuyendo la variabilidad cedida por factores perturbantes, es decir aquellos agentes externos que pueden inferir en la respuesta pero que no representan gran interés [51].

**Etapas en el diseño de experimentos:** el diseño de experimentos se basa en realizar las suficientes pruebas y repeticiones para obtener los resultados que se requieren a un costo mínimo, por ello se deben realizar diferentes actividades que permitan obtener los mejores resultados; estas etapas son: Identificación y exposición del problema, Elección de los factores, los niveles y los rangos, Selección de la variable de respuesta, Elección del diseño experimental, Realización del experimento, Análisis de los datos, Conclusiones y recomendaciones [51].

Para el análisis de los datos obtenidos, se recomienda recurrir a métodos estadísticos que permitan determinar si las diferencias entre las muestras son grandes, de tal forma que garantice las diferencias a nivel del proceso; el más usado es el ANOVA o análisis de varianza [50].



## 2. Capítulo Obtención de probetas

### 2.1 Alistamiento materia prima

#### 2.1.1 Preparación del PP reciclado y triturado

Para la preparación del PP se realizó el siguiente procedimiento de acuerdo a como se ilustra en la **Figura 2-1**.

Paso 1 Se recolectan las tapas de los diferentes envases en lugares como el trabajo, tiendas de suministro local y en casa.

Paso 2. Se realiza una limpieza del material con el fin de eliminar restos de alimentos u otro líquido con el que hubieran estado en contacto.

Paso 3. Se dejan secar al aire libre alrededor de 12 horas y se separan por colores.

Paso 4. El material ya limpio y seco se tritura manualmente, con ayuda de un bisturí y un pelacables usando la debida protección.

Paso 5. Ya triturado el material es guardado en diferentes contenedores hasta el momento de su uso.

**Figura 2-1.** Preparación del PP.

Fuente. Autor, 2019

### 2.1.2 Preparación de la fibra de Guadua

La guadua utilizada en la elaboración de las probetas proviene de la región del Quindío, es una guadua angustifolia del biotipo cebolla y está inmunizada por el proceso de aire caliente, además de contar con un secado adecuado el cuál reduce su humedad al 15%. La guadua utilizada es la obtenida luego de que esta pasa por la acolilladora, como residuo deja una fibra corta de aproximadamente 2 a 3 mm de largo [52] y con un diámetro de 1 mm aprox. Esta fue suministrada por la empresa Guadua Factoría ubicada en la ciudad de Duitama. A

continuación, se describe el proceso de preparación de la guadua, el cual se ilustra en la **Figura 2-2**.

Paso 1. Localización de la guadua en condiciones se secado, inmunizado y tamaño para su uso.

Paso 2. Esta guadua se tamiza con ayuda de un filtro con el fin de eliminar aquellas astillas grandes, es decir con medidas mayores a las estipuladas anteriormente.

Paso 3. La guadua seleccionada cuenta con un tamaño uniforme, esta se almacena hasta su posterior uso.

**Figura 2-2.** Preparación de la guadua.



Fuente. Autor, 2019.

### 2.1.3 Preparación de la cerámica en polvo

La cerámica usada se obtuvo del residuo sobrante que se descarta en las remodelaciones o instalación de cerámicas en construcción, ya sea en edificios o en los hogares. La usada en este proyecto fue facilitada por un maestro de obra que realizó un cambio de baldosas en la ciudad de Sogamoso, se usó aquella que no tenía residuos de cemento, facilitando determinar que esta era de la marca Corona. En la **Figura 2-3**, se observa el proceso realizado a la cerámica, el cual se describe a continuación.

Paso 1. La cerámica reciclada se trituró en trozos de 2\*2 cm en promedio para iniciar el proceso de molienda.

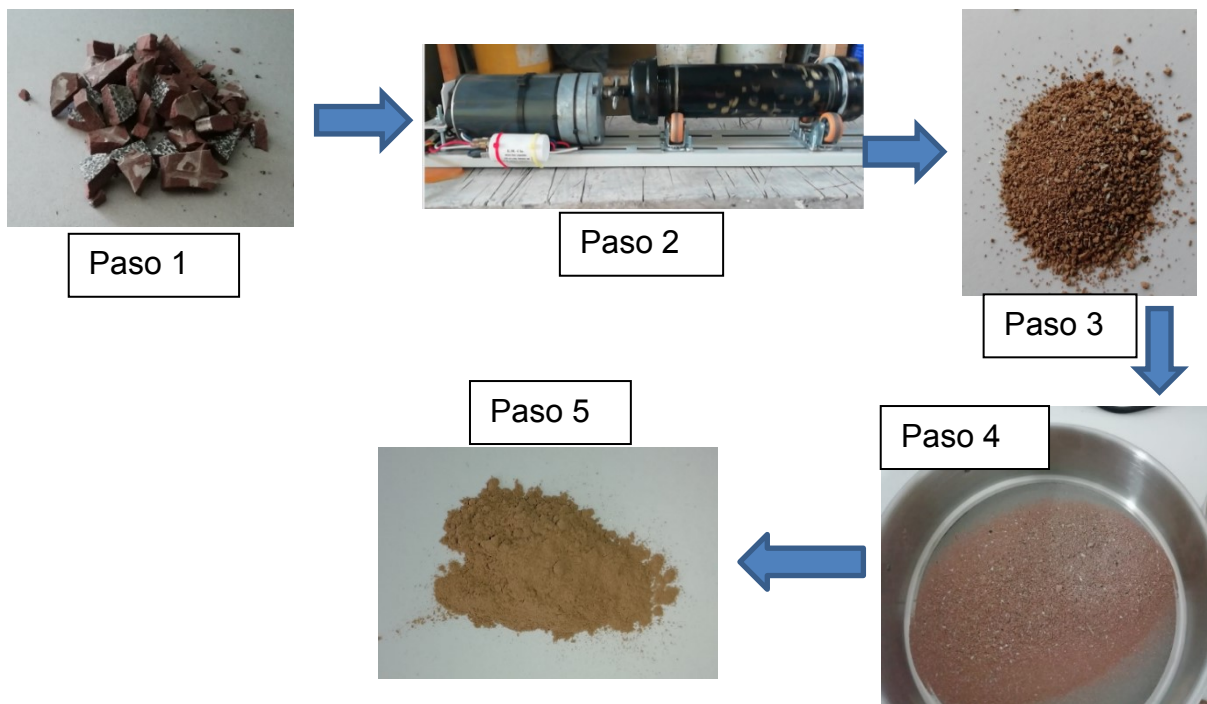
Paso 2. Los trozos se introducen al molino de bolas, ver **Anexo 3**, por periodos de 10 minutos para su molienda, este proceso se repite 4 veces con una sola cantidad (100 gr) de material para garantizar que este se muele en la mayor proporción posible.

Paso 3. Se tamiza el material obtenido del molino de bolas.

Paso 4. El tamiz usado fue de malla número **100**, para un tamaño de partícula de **150  $\mu\text{m}$** .

Paso 5. Se almacena la cerámica de **150  $\mu\text{m}$**  para su posterior uso.

**Figura 2-3.** Preparación de la cerámica.



Fuente. Autor, 2019.

## 2.2 Proceso de preparación de las diferentes proporciones

Para determinar las proporciones de mezclas establecidas en la **Tabla 2-1**, se tomó como referencia el trabajo de Hurtado et al [6], quienes añadieron nanoarcillas en proporciones de 3%, 5% y 7% y el trabajo de Karen Catherine Lázaro León, Héctor E. Gonzáles Mora y Aldo J. Cárdenas Oscanoa [53], en el cual añadieron fibra de bambú en proporciones del

50%, 40% y 30%; siendo la del 30% la que presentó las mejores propiedades mecánicas. En la preparación de las diferentes proporciones del MC, se estableció una nomenclatura para identificar fácilmente cada composición y el valor del porcentaje de cada material como se muestra en la **Tabla 2-1**, donde PP=Polipropileno, G=Guadua y C=Cerámica.

**Tabla 2-1.** Nomenclatura de las combinaciones del MC.

Nomenclatura	% PP	% Guadua	% Cerámica
<b>PP 100</b>	100	0	0
<b>PPGC 3505</b>	60	35	5
<b>PPGC 3307</b>	60	33	7
<b>PPGC 3010</b>	60	30	10

Fuente. Autor, 2019.

### 2.3 Mezcla de material

Para mezclar los diferentes materiales, se usó i) una gramera digital marca Imperial Houseware con una capacidad de medida de hasta 5 Kg y un margen de error de 0.1gramos, ii) una cuchara plástica de capacidad de 10 gr para su mezcla y adición a la extrusora, y iii) moldes plásticos para la preparación de la mezcla, tal como se ilustra en la **Figura 2-4**.

Paso 1. Se procedió a pesar cada material para determinar las proporciones indicadas en la **Tabla 2.1**, para cada mezcla se pesaron 400 gramos en total, variando sus porcentajes en cada material, como se muestra en la **Tabla 2-2**.

**Tabla 2-2.** Peso de cada material para las diferentes mezclas.

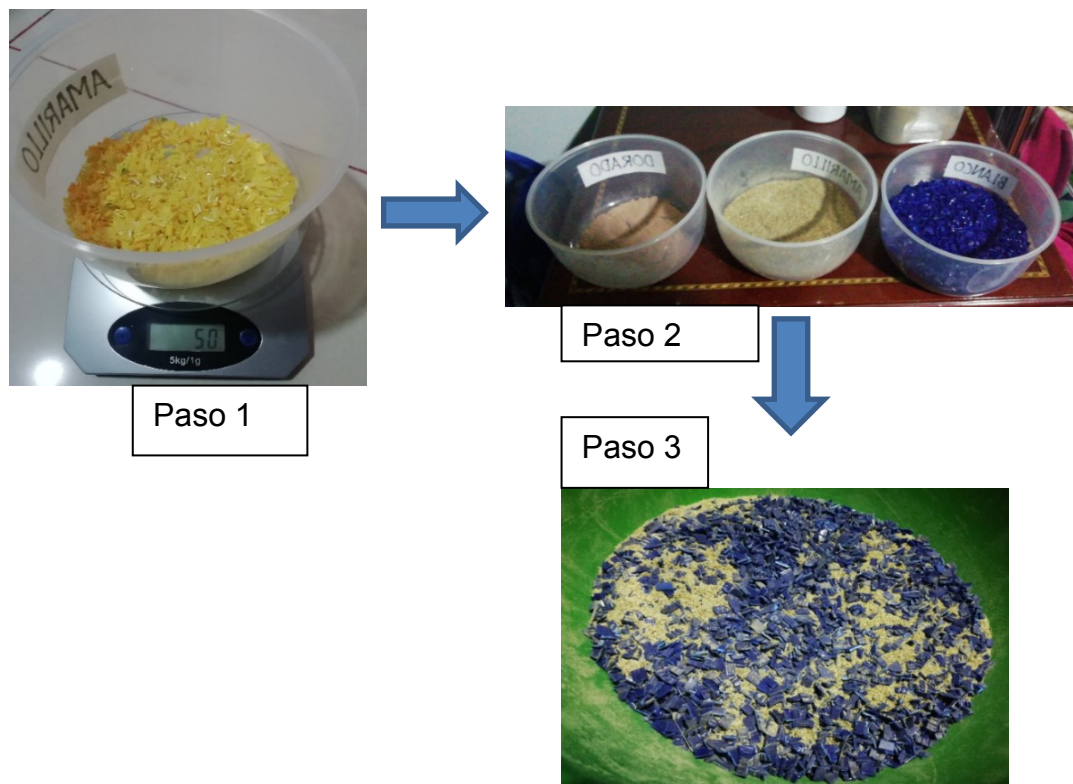
Nomenclatura	Peso (gr)	Peso (gr)	Peso (gr)
	PP	Guadua	Cerámica
<b>PP 100</b>	400	0	0
<b>PPGC 3505</b>	240	140	20
<b>PPGC 3307</b>	240	132	28
<b>PPGC 3010</b>	240	120	40

Fuente. Autor, 2019

Paso 2. Se separaron los materiales en diferentes contenedores para luego ser mezclados.

Paso 3. El material se mezcló con ayuda de una cuchara plástica de capacidad de 10 gr, misma que se usa para añadir la mezcla a la extrusora, ver **Anexo 5** y así extruir las probetas en los respectivos moldes, ver **Anexo 6**.

**Figura 2-4.** Mezcla de los diferentes materiales.



Fuente. Autor, 2019.

## 2.4 Construcción de las probetas

Para determinar la cantidad de probetas que se debían realizar para los ensayos de tensión y flexión, se tomaron como referencia las normas ASTM 638D para tensión de plásticos, ver **Anexo 1** y ASTM 790D para flexión de plásticos, ver **Anexo 2**, obteniendo los resultados mostrados en la **Tabla 2-3**.

**Tabla 2-3.** Cantidad de probetas a elaborar.



COMPUESTO	E. TENSIÓN	E. FLEXIÓN
PP 100	8	8
PPGC 3505	8	8
PPGC 3307	8	8
PPGC 3010	8	8

Fuente. Autor, 2019.

**Proceso de extrusión:** Para la extrusión de las diferentes mezclas del MC y el PP, se usó una temperatura de **260 °C**, esto se determinó por un estudio de Calorimetría por escaneo diferencial (DSC por sus siglas en inglés) [54], el cuál determina que el PP debe someterse a una temperatura mayor a los 200°C para que este se deforme de manera permanente. Al realizar pruebas de extrusión, se determinaron las condiciones experimentales bajo las cuáles la máquina permitía hacer el extruido de los tres materiales mezclados, permitiendo que el material fluyera y además conservar los materiales de refuerzo, vaciando en los respectivos moldes metálicos ver **Anexo 6**, según normas ASTM 638D para tensión y ASTM 790D para flexión. En la siguiente tabla se podrá observar cada grupo de probetas. Para su elaboración se utilizó PP de diferente color en cada mezcla.

A continuación, de la **Figura 2-5** a la **Figura 2-8** se muestran las probetas de tensión y flexión fabricadas.

**Figura 2-5.** Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PP 100



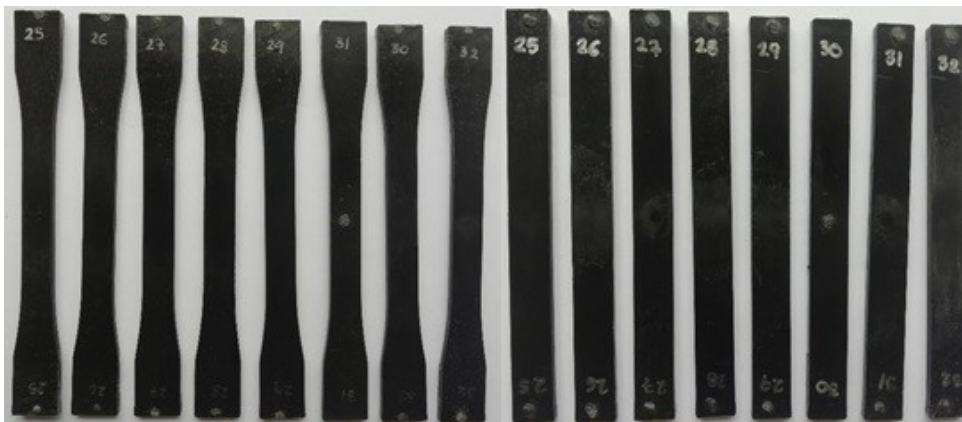
Fuente. Autor 2020.

**Figura 2-6.** Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PPGC 3505

Fuente. Autor 2020.

**Figura 2-7.** Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PPGC 3307

Fuente. Autor 2020.

**Figura 2-8.** Probetas de tensión (izquierda) y flexión (derecha) de PPGC 3010

Fuente. Autor 2020.



## 3. Capítulo Ensayos de laboratorio y análisis de resultados

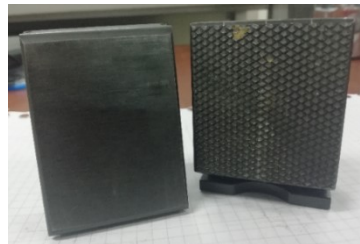
### de resultados

Para los ensayos de tensión y flexión del material, se acudió a los laboratorios de ensayos mecánicos de la Universidad Antonio Nariño sede sur en Bogotá, por medio de la máquina de ensayos de tensión que permite generar la gráfica esfuerzo-deformación y así identificar las propiedades del compuesto.

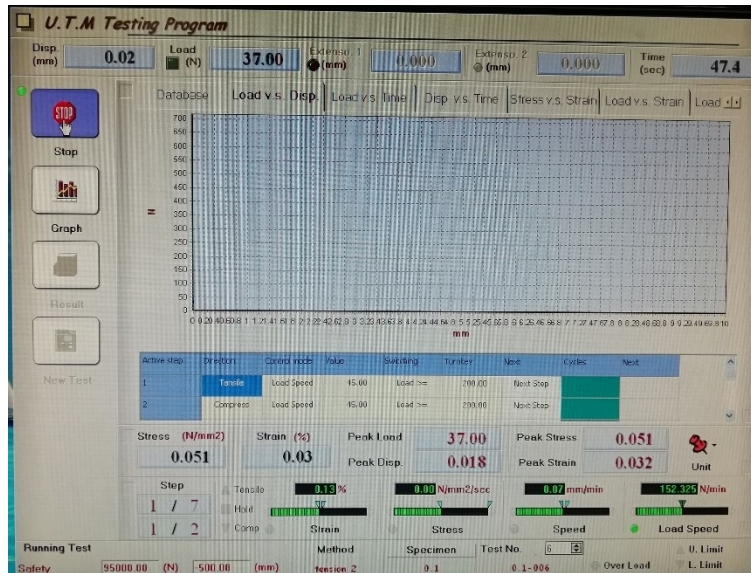
#### 3.1 Ensayo de tensión

Se realizaron ensayos de tensión a las diferentes probetas de 100% PP reciclado y de MC obtenidas de acuerdo con la norma ASTM 638 D para tensión en plásticos. Para esto se utilizó la máquina de ensayos universales, modelo HT-2102 serial 2129 de marca HUNGTA., ver en **Figura 3-1**, y el software predispuesto con esta máquina, como se muestra en la **Figura 3-2**.

**Figura 3-1.** Máquina universal de ensayos mecánicos y mordazas para plásticos.



Fuente. Autor, 2019.

**Figura 3-2.** Ambiente gráfico del programa:

Fuente. Autor 2019.

El procedimiento inició con una toma de medidas de las probetas para asegurar que estas contaban con las medidas indicadas por la norma ASTM 638D y que no habían sufrido algún tipo de deformación por el proceso de extrusión empleado.

Posteriormente se estandarizaron los parámetros de ensayo, según la norma ASTM 638D, cómo, la velocidad de ensayo, posicionamiento de las probetas y la toma de los datos. Inicialmente se realizó una prueba para calibrar la máquina como se muestra en la **Figura 3-3**.

**Figura 3-3.** Prueba preliminar calibración de la máquina de ensayos universal.

Fuente. Autor 2019.

### ✓ Ejecución del ensayo de tensión

Este ensayo es el más usado para determinar el comportamiento mecánico de un material, consiste en someter la probeta a un esfuerzo axial y una velocidad constante llevándola al punto de rotura.

A continuación, de la **Figura 3-4** a la **Figura 3-7** se muestran las probetas luego del ensayo de tensión.

**Figura 3-4.** Probetas de PP100 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión.



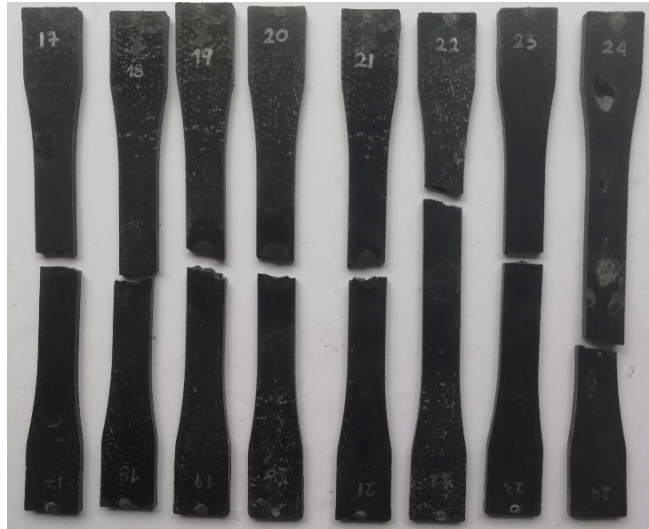
Fuente. Autor 2020.

**Figura 3-5.** Probetas de PPGC 3505 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión.



Fuente. Autor 2020.

**Figura 3-6.** Probetas de PPGC 3307 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión.



Fuente. Autor 2020.

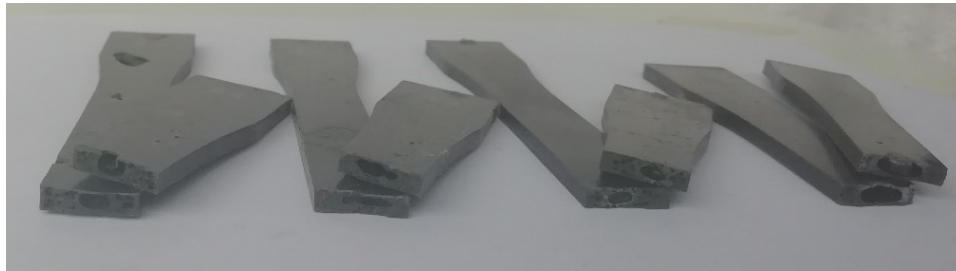
**Figura 3-7.** Probetas de PPGC 3010 luego de aplicar el ensayo mecánico de tensión.



Fuente. Autor 2020.

Algunas de las probetas presentaron ruptura en zonas diferentes a la del centro, esto fue debido a la presencia de burbujas, lo cual se puede observar en la **Figura 3-8**.

**Figura 3-8.** Presencia de burbujas en las probetas de tensión del MC.



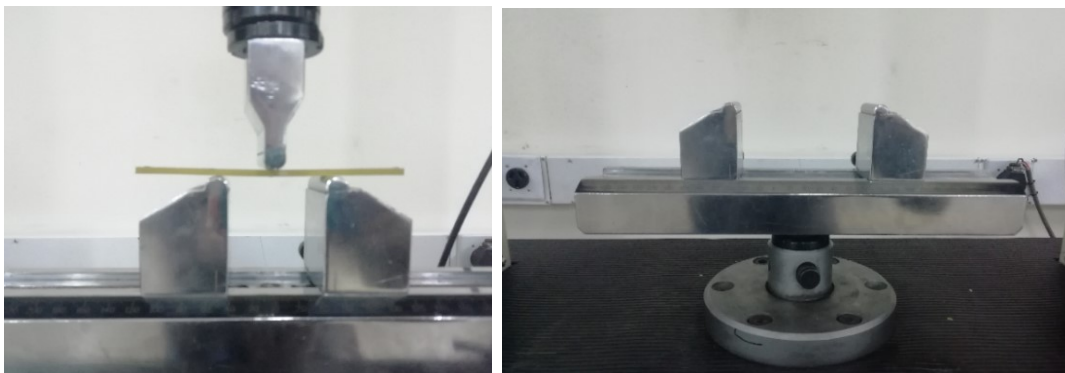
Fuente. Autor 2020.

### 3.2 Ensayo de flexión

El objetivo de este ensayo es determinar las propiedades mecánicas de materiales sometidos a esfuerzos y deformaciones en los puntos máximos y de rotura, además de determinar su módulo elástico, teniendo en cuenta la separación de los apoyos calculada a partir del espesor de la probeta.

Se realizaron ensayos de flexión a las diferentes probetas de 100% PP reciclado y de MC obtenidas de acuerdo con norma ASTM 790D para plásticos reforzados. Se usó la misma máquina que para los ensayos de tensión, pero se adecua para las pruebas de flexión, ver **Figura 3-9**.

**Figura 3-9.** Máquina universal adecuada para ensayos de flexión.



Fuente. Autor, 2019.

Para determinar la velocidad del ensayo de flexión, se tomó como referencia la norma ASTM 790D así mismo para determinar los puntos de apoyo, para esto se usó la **Ecuación 5**.

Velocidad del ensayo

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Z= taza de deformación

L<sup>2</sup> = zona centro de la probeta

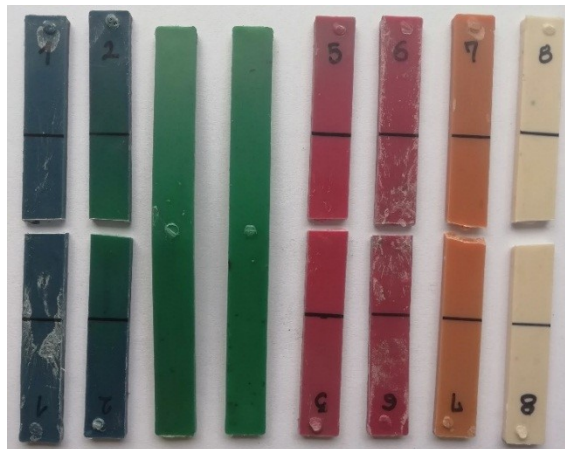
d= grosor de la probeta

$$R = \frac{0.01 \text{ mm/mm/mm}/(52\text{mm})}{6(3.2\text{mm})} = 1.4 \text{ mm/min}$$

Los puntos de apoyo se establecieron bajo la relación 16:1 según la norma, lo que da una zona centro de la probeta de 52 mm.

A continuación, de la **Figura 3-10** a la **Figura 3-13** se muestran las probetas luego del ensayo de flexión.

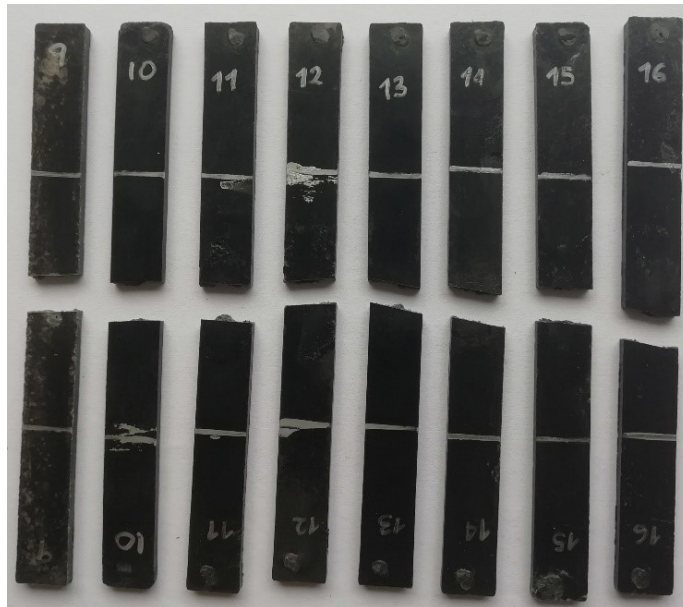
**Figura 3-10.** Probetas de PP100 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión.



Fuente. Autor 2020.



**Figura 3-11.** Probetas de PPGC 3505 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión.



Fuente. Autor 2020.

**Figura 3-12.** Probetas de PPGC 3307 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión.



Fuente. Autor 2020.

**Figura 3-13.** Probetas de PPGC 3010 luego de aplicar el ensayo mecánico de flexión.

Fuente. Autor 2020.

### 3.3 Proceso experimental

**Aleatorización:** Este proceso se realizó de manera muy sencilla, las **32** probetas de tensión se dispusieron en una bolsa plástica en donde se combinaron y se adquirieron una a una a medida que se realizaban los ensayos mecánicos de tensión. Este mismo procedimiento se aplicó a las probetas de flexión. Esta aleatorización se muestra en la **Tabla 3-1**.

**Tabla 3-1.** Aleatorización de las probetas de Tensión y Flexión

Número de probeta	TENSIÓN	FLEXIÓN
1	32	26
2	14	20
3	9	12
4	3	28



<b>5</b>	26	3
<b>6</b>	10	18
<b>7</b>	4	31
<b>8</b>	22	10
<b>9</b>	31	22
<b>10</b>	11	29
<b>11</b>	7	7
<b>12</b>	28	13
<b>13</b>	15	19
<b>14</b>	13	2
<b>15</b>	22	24
<b>16</b>	25	14
<b>17</b>	12	25
<b>18</b>	18	6
<b>19</b>	21	30
<b>20</b>	27	23
<b>21</b>	17	5
<b>22</b>	30	27
<b>23</b>	23	16
<b>24</b>	19	21
<b>25</b>	6	4
<b>26</b>	29	32
<b>27</b>	20	1
<b>28</b>	51	17
<b>29</b>	12	15
<b>30</b>	24	8
<b>31</b>	16	11
<b>32</b>	8	9

Fuente: Autor, 2020.

### 3.4 ANOVA pruebas tensión

El proceso del análisis de los datos se realizó por ANOVA con ayuda del Software Minitab18. El resultado arrojado de este proceso se muestra a continuación.

**Módulo de elasticidad a tensión:** A continuación, se muestra la respuesta obtenida por el software Minitab aplicando el método ANOVA.

ANOVA de un solo factor: 100%. 35%. 33%. 30%

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

#### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	100%. 35%. 33%. 30%

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	209506	69835	8,77	0,000
Error	28	223073	7967		
Total	31	432580			

#### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
89,2576	48,43%	42,91%	32,65%

**Medias**

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
100%	8	369,8	112,5	(305,1. 434,4)
35%	8	567,0	62,9	(502,4. 631,6)
33%	8	565,0	91,0	(500,4. 629,6)
30%	8	474,5	83,6	(409,9. 539,1)

*Desv.Est. agrupada = 89,2576*

Como indican los resultados obtenidos en el análisis de varianza, el valor de  $p=0.000$  es menor a  $\alpha = 0,05$ , por tanto, se puede rechazar la hipótesis nula, es decir que las medias no son iguales, lo que concluye que en efecto hay un cambio en el PP al adicionar materiales como la guadua y la cerámica para este caso.

- ✓ **Módulo de elasticidad a tensión:** En la **Tabla 3-2** se pueden evidenciar los valores de los módulos de elasticidad a tensión y su respectiva desviación estándar.

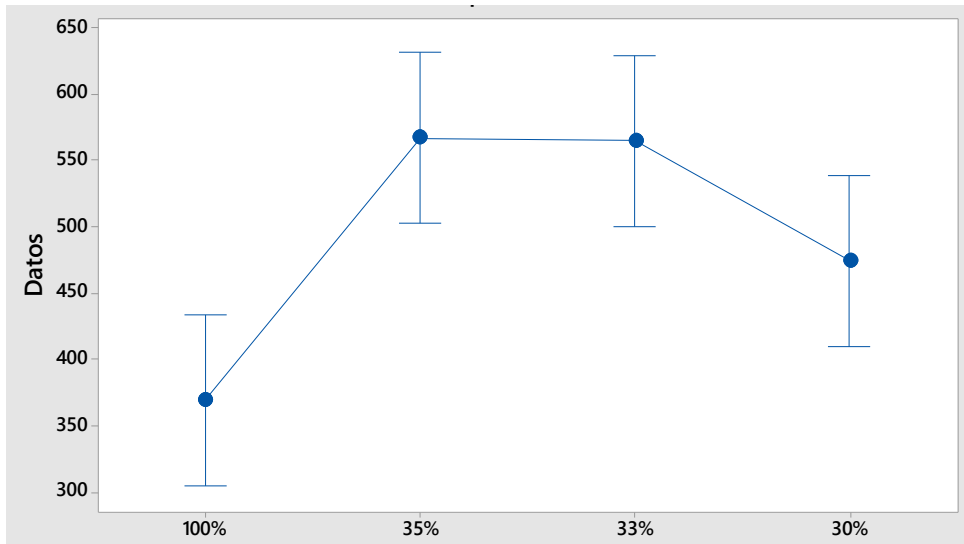
**Tabla 3-2.** Módulos de elasticidad a tensión y desviación estándar

Combinación	Modulo elasticidad a tensión (MPa)
<b>PP100</b>	369.8±112.5
<b>PPGC3505</b>	567±62.9
<b>PPGC3307</b>	565±91
<b>PPGC3010</b>	474.5±83.6

Fuente. Autor 2020.

En la **Figura 3-14** se puede evidenciar el comportamiento del módulo de elasticidad para el PP y los diferentes MC.

**Figura 3-14.** Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas.

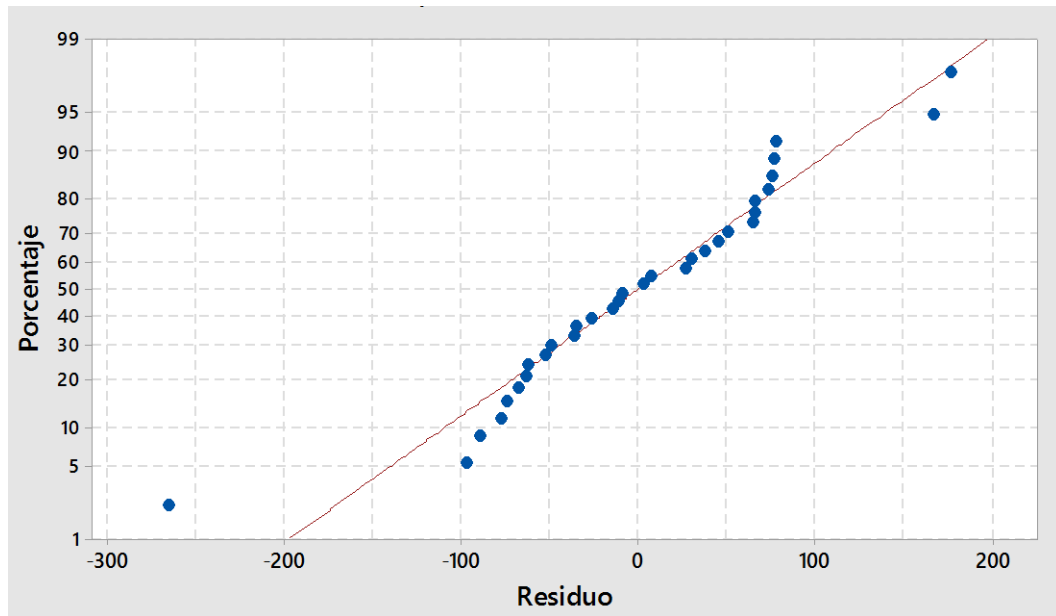


Fuente: Minitab 18

De acuerdo con la gráfica anterior, se establece que el módulo de elasticidad a tensión del PP mejoró al adicionarle guadua y cerámica, al comparar el valor de **PP100** con las diferentes mezclas se encuentran los siguientes porcentajes de aumento. Un aumento del **53.49%** de la probeta **PPGC3505**, un **52.79%** de la probeta **PPGC3307** y un **28.31%** de la probeta **PPGC3010**, siendo este último el valor más bajo de aumento en comparación con las otras mezclas. Por lo que se puede concluir que la adición de guadua y cerámica conlleva a mejorar el módulo de elasticidad del PP.

En la **Figura 3-15** se muestra la gráfica de probabilidad normal, donde se observa que los puntos se ajustan a la línea recta, lo cual indica que los supuestos de distribución normal y varianza constante son válidos y los resultados el ANOVA son confiables.

**Figura 3-15.** Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla.



Fuente: Minitab 18

**Esfuerzo último a tensión:** A continuación, se muestra la respuesta obtenida por el software Minitab aplicando el método ANOVA.

## ANOVA de un solo factor: 100%. 35%. 33%. 30%

### Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	100%. 35%. 33%. 30%

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	407565	135855	15,62	0,000
Error	28	243539	8698		
Total	31	651104			

## Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
93,2622	62,60%	58,59%	51,15%

## Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
100%	8	507,0	91,5	(439,5. 574,5)
35%	8	342,9	97,4	(275,3. 410,4)
33%	8	217,3	91,9	(149,7. 284,8)
30%	8	247,9	92,1	(180,3. 315,4)

*Desv.Est. agrupada = 93,2622*

Como indican los resultados obtenidos en el análisis de varianza, el valor de  $p=0.000$  es menor a  $\alpha = 0,05$ , por tanto, se puede rechazar la hipótesis nula, es decir que las medias no son iguales, lo que concluye que en efecto hay un cambio en el PP al adicionar materiales como la guadua y la cerámica para este caso.

- ✓ **Esfuerzo último a tensión:** En la **Tabla 3-3** se pueden observar los valores obtenidos de la Tensión de rotura con su respectiva desviación estándar.

**Tabla 3-3.** Esfuerzo último a tensión y desviación estándar.

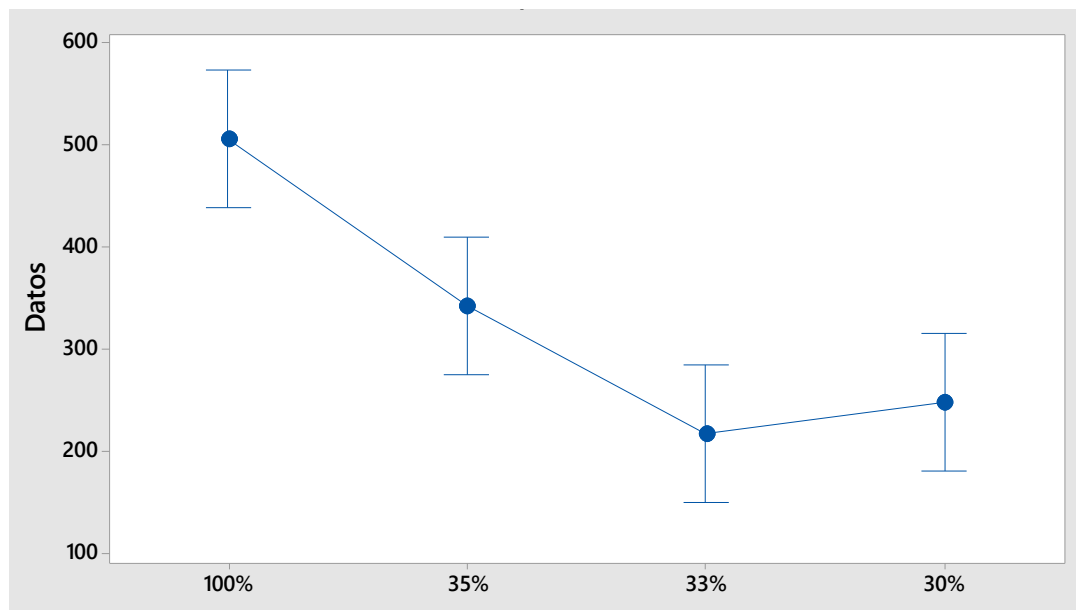
Combinación	Esfuerzo último a tensión (MPa)
PP100	507±91.5
PPGC3505	342.9±97.4

<b>PPGC3307</b>	217.3±91.9
<b>PPGC3010</b>	247.9±92.1

Fuente. Autor 2020.

En la **Figura 3-16** se puede evidenciar el comportamiento del esfuerzo último a tensión para el PP y los diferentes MC.

**Figura 3-16.** Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas.

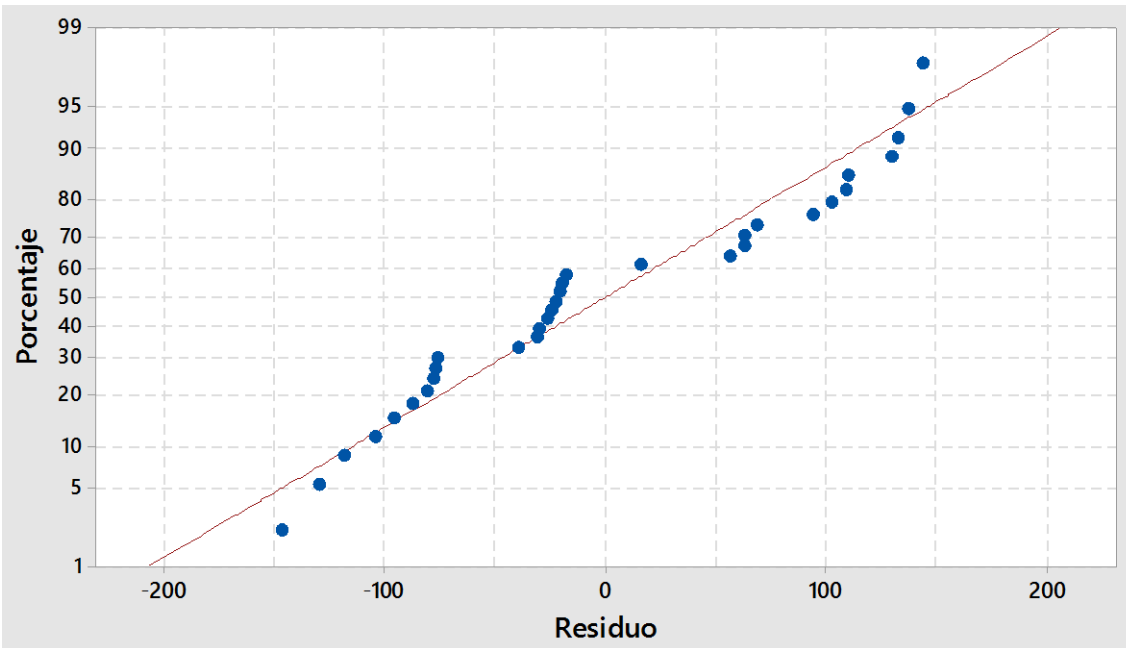


Fuente: Minitab 18

El esfuerzo último a tensión muestra que, para los MC obtenidos, este no superó los valores de **PP100**, por el contrario, disminuyó un **32.37%** en **PPGC3505** y un **51.1%** en **PPCG3010**. La combinación **PPGC3307** mostró el valor de disminución más bajo **57.14%** en comparación con las otras mezclas. Se considera la hipótesis que la cerámica ayude a la tensión de rotura del material, puesto que la mezcla PPGC3010 tiene un valor superior a la PPGC3307, es decir hay un aumento de este material del 3%. En cuanto al valor obtenido de PPGC3505 se concluye que al aumentar el contenido de guadua el esfuerzo último a tensión pueda aumentar.

En la **Figura 3-17** se muestra la gráfica de probabilidad normal, donde se observa que los puntos se ajustan a la línea recta, lo cual indica que los supuestos de distribución normal y varianza constante son válidos y los resultados el ANOVA son confiables.

**Figura 3-17.** Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla.



Fuente: Minitab 18

### 3.5 ANOVA pruebas flexión

**Esfuerzo último a flexión:** A continuación, se muestra la respuesta obtenida por el software Minitab aplicando el método ANOVA.

ANOVA de un solo factor: 100%. 35%. 33%. 30%

#### Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$



Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	100%. 35%. 33%. 30%

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	516,4	172,13	2,92	0,051
Error	28	1648,9	58,89		
Total	31	2165,3			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7,67389	23,85%	15,69%	0,54%

### Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
100%	8	28,68	8,67	(23,12. 34,23)
35%	8	21,61	6,39	(16,05. 27,17)
33%	8	19,72	8,71	(14,17. 25,28)
30%	8	28,50	6,61	(22,94. 34,05)

Desv.Est. agrupada = 7,67389

Gráfica de intervalos de 100%. 35%. ...

Gráfica normal de residuos para 100%. 35%. ...

Como indican los resultados obtenidos en el análisis de varianza, el valor de  $p=0.051$  es muy parecido a  $\alpha = 0,05$ , no se evidencia una diferencia significativa, por tanto no es posible rechazar o aceptar la hipótesis nula, al tener una diferencia tan baja entre estos dos valores, se puede deducir que las medias son iguales, además que la desviación estándar no es muy alta entre los grupos.

- ✓ **Esfuerzo último a flexión:** En la **Tabla 3-4** se muestran los valores del esfuerzo máximo obtenido con su respectiva desviación estándar.

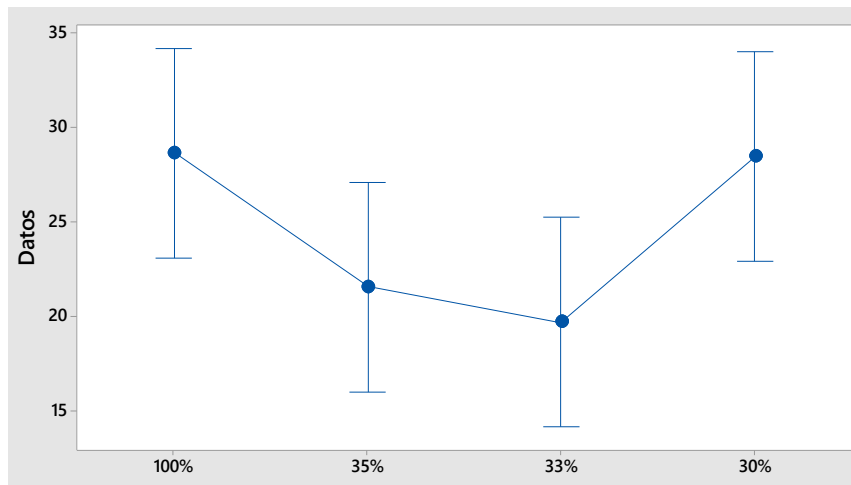
**Tabla 3-4.** Esfuerzo último a flexión y desviación estándar.

Combinación	Esfuerzo último a flexión (MPa)
PP100	28.68±8.67
PPGC3505	21.61±6.39
PPGC3307	19.72±8.71
PPGC3010	28.50±6.61

Fuente. Autor 2020.

En la **Figura 3-18** se puede evidenciar el comportamiento del esfuerzo último a flexión para el PP y los diferentes MC.

**Figura 3-18.** Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas.

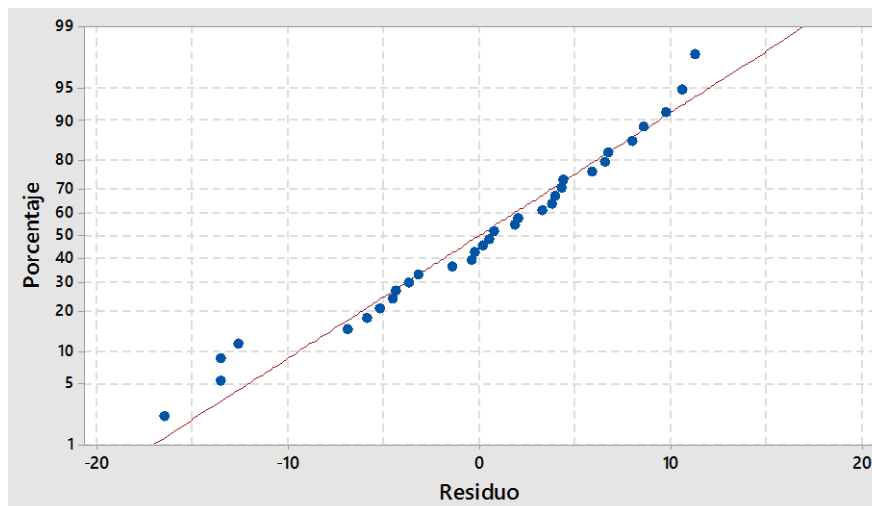


Fuente: Minitab 18

El esfuerzo último a flexión obtenido del **PP100** no fue superado por el de los MC analizados, se evidencia que la mezcla **PPGC3010** tuvo una deferencia del **0.63%** respecto a **PP100**. Es de notar que esta mezcla es la de mayor cantidad de ceramica (10%) y menor porcentaje de Guadua (30%) por lo que se puede suponer que al variar las proporciones de estos dos materiales, es decir, aumentar el porcentaje de cerámica y disminuir el porcentaje de Guadua, el esfuerzo último a flexión pueda ser mejorado. A este efecto entre los dos componentes se le llama interacción, para determinar si esta interacción es real o no, es necesario realizar un proceso experimental enfocado en este hecho. Las otras mezclas, presentaron una caída del **24.65%** para **PPGC3505** y **31.24%** para **PPGC3307**.

En la **Figura 3-19** se muestra la gráfica de probabilidad normal, donde se observa que los puntos se ajustan a la línea recta, lo cual indica que los supuestos de distribución normal y varianza son válidos y los resultados el ANOVA son confiables.

**Figura 3-19.** Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla.



**Fuente:** Minitab 18

**Módulo de elasticidad a flexión:** A continuación, se muestra la respuesta obtenida por el software Minitab aplicando el método ANOVA.

**ANOVA de un solo factor: 100%. 35%. 33%. 30%**

**Método**

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	100%. 35%. 33%. 30%

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	2,753	0,9178	1,79	0,171
Error	28	14,318	0,5114		
Total	31	17,071			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,715090	16,13%	7,14%	0,00%

### Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
100%	8	2,172	0,504	(1,654. 2,690)
35%	8	2,968	0,676	(2,450. 3,486)
33%	8	2,555	0,941	(2,037. 3,073)
30%	8	2,756	0,670	(2,239. 3,274)

Desv.Est. agrupada = 0,715090

**Gráfica de intervalos de 100%. 35%. ...**

**Gráfica normal de residuos para 100%. 35%. ...**

Para este último análisis de varianza se evidencia que el valor de  $\alpha = 0,05$  es superado por  $P=0,171$ , para este análisis se determina que se puede aceptar la hipótesis nula encontrando que no hay diferencias significativas en los valores promedios en el módulo de elasticidad a flexión, además que su desviación estándar no muestra una variación muy alta entre los valores.

- ✓ **Módulo de elasticidad a flexión:** En la **Tabla 3-5** se muestran los módulos de elasticidad a flexión y su respectiva desviación estándar.

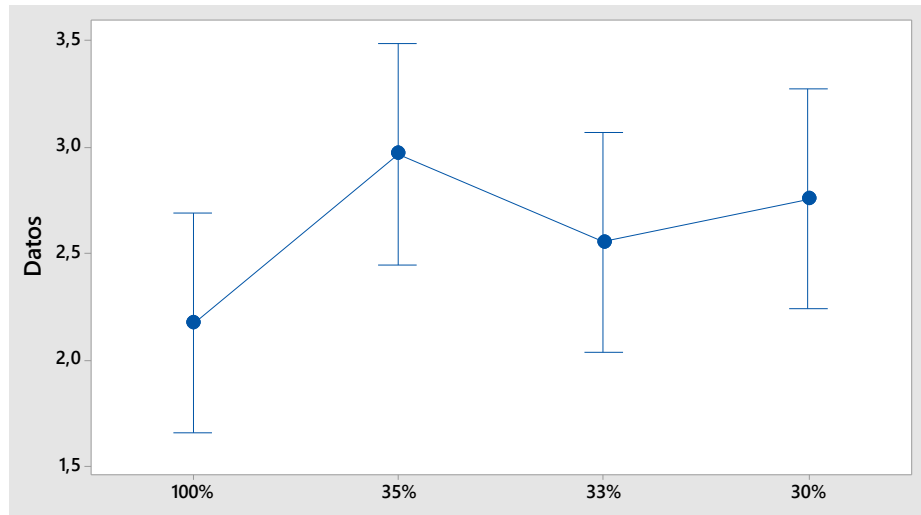
**Tabla 3-5.** Módulo de elasticidad a flexión y varianza estándar.

<b>Combinación</b>	<b>Módulo elasticidad a flexión (MPa)</b>
<b>PP100</b>	2.17±0.50
<b>PPGC3505</b>	2.96±0.67
<b>PPGC3307</b>	2.55±0.94
<b>PPGC3010</b>	2.75±0.67

Fuente. Autor 2020.

En la **Figura 3-20** se puede evidenciar el comportamiento del módulo de elasticidad a flexión para el PP y los diferentes MC.

**Figura 3-20.** Gráfica de intervalos para el PP y las diferentes proporciones de mezcla realizadas.

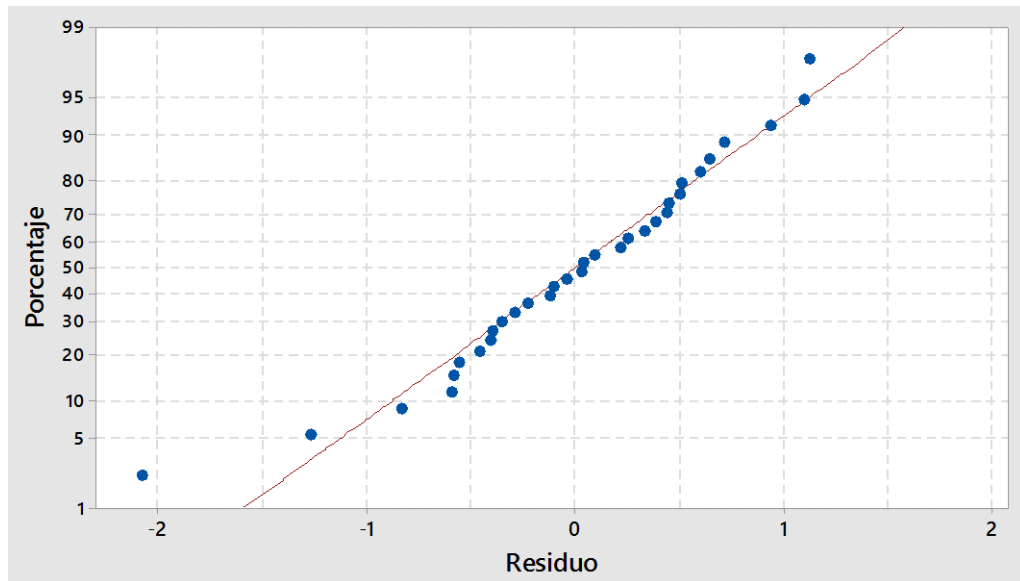


Fuente: Minitab 18

Conforme la gráfica anterior se puede evidenciar que el módulo de elasticidad a flexión del **PP100** se mantiene dentro de los valores medios de los MC analizados, la diferencia entre sus valores es del **36.41%** para **PPGC3505**, **17.55%** para **PPGC3307** y del **26.73%** para **PPGC3010**. Puesto que la diferencia entre los valores medios es baja se puede concluir que no hubo una mejora evidente en el módulo de elasticidad a flexión del PP al añadirle Guadua y cerámica en distintas proporciones.

En la **Figura 3-21** se muestra la gráfica de probabilidad normal, donde se observa que los puntos se ajustan a la línea recta, lo cual indica que los supuestos de distribución normal y varianza son válidos y los resultados el ANOVA son confiables.

**Figura 3-21.** Gráfica de probabilidad normal para el PP y las diferentes proporciones de mezcla.



Fuente: Minitab 18

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- ✓ Se obtuvieron las probetas de PP 100, PPGC 3505, PPGC 3307 y PPGC 3010, mediante el proceso de extrusión logrando adhesión fibra-matriz para los respectivos ensayos mecánicos.
- ✓ Durante los ensayos de tensión se evidenció que algunas probetas tenían burbujas en su interior, esto debido a los vapores generados al momento de extruir, ocasionando concentración de esfuerzo que promovió la fractura en esa zona, sin afectar que disminuyera el valor de las mediciones con respecto a aquellas que no presentaron burbujas.
- ✓ El módulo de elasticidad a tensión del PP se mejoró en un 53.49% al adicionarle guadua en un 35% y cerámica en un 5%. Las otras dos mezclas presentaron aumentos en proporciones del 52.79% para PPGC3307 y del 28.31% para PPGC3010, siendo esta última la de menor aumento.
- ✓ En los análisis de flexión se evidencia que no hay una mejora perceptible para su esfuerzo último a flexión y su módulo de elasticidad. Aunque en el esfuerzo último a flexión, se observa que la combinación PPGC3010 alcanza los mismos valores que PP100, al ser la mezcla con mayor cantidad de cerámica y menor cantidad de Guadua, se concluye que al variar estos dos componentes en proporciones más altas se pueda mejorar el esfuerzo ultimo a flexión.
- ✓ La guadua usada para el desarrollo de este trabajo, fue inmunizada más no deslignificada, proceso que se realiza en el uso de fibras naturales para la creación de materiales compuestos con resinas plásticas para asegurar una correcta adhesión. Este proceso no se realizó con el fin de experimentar con la fibra



inmunizada, evidenciando que esta fibra permitió una mezcla adecuada con el PP por el método de extrusión.

## 4.2 Recomendaciones

- De acuerdo con la investigación realizada, en Colombia, se encuentra una gran variedad de tipos de guadua, por lo que es recomendable seguir con esta investigación, no solo cambiando los porcentajes de los componentes sino además usar otros tipos de guadua.
- El MC obtenido contiene cerámica, componente de propiedades térmicas útiles en el desarrollo de MC, por tanto se recomienda la idea de realizar pruebas de esfuerzos a diferentes temperaturas, esto con el fin de analizar si este material tiene o no alguna mejora en la temperatura de utilización del PP o la guadua.
- Al analizar los datos obtenidos en flexión, se observa la probabilidad de hacer experimentos en los cuales el porcentaje de cerámica sea mayor al 10% y el de Guadua menor al 30%, esto debido a la interacción mostrada por estos dos componentes en los análisis mecánicos del esfuerzo ultimo a flexión.

## 5. Bibliografía

- [1] J. H. William F Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*, Cuarta. McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V., 2006.
- [2] Greenpeace, «¿Cómo llega el plástico a los océanos y qué sucede entonces? - ES», *Greenpeace España*, 2015. <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/como-llega-el-plastico-a-los-oceanos-y-que-sucedentonces/>.
- [3] J. W. R. Colorado y R. T. Arroyave, «Caracterización de un material compuesto matriz termoestable reforzado con fibra de guadua», p. 243, 2017.
- [4] C. A. Garzón, «Desarrollo de materiales compuestos de polipropileno y nanoestructuras de carbono», p. 110, 2014.
- [5] C. Caicedo, A. Vázquez Arce, L. M. Crespo, H. De la Cruz, y Ó. H. Ossa, «Material compuesto de matriz polipropileno (PP) y fibra de cedro: influencia del compatibilizante PP-g-MA», *Informador Técnico*, vol. 79, n.º 2, p. 118, dic. 2015, doi: 10.23850/22565035.156.
- [6] S. G. G. Hurtado, J. C. Revelo, C. F. Pruna, y V. H. G. Barragán, «Obtención y Caracterización de Compuestos de Polipropileno Reforzado con Nanoarcillas Mediante Extrusión e Inyección», *Revista Politécnica*, vol. 35, n.º 3, p. 43, feb. 2015, doi: 10.33333/rp.v35i3.397.
- [7] K. Gondra, S. Neira, S. Allue, W. Greaves, y J. L. Ruíz, «Estudio del proceso de fabricación de composites de polipropileno reforzados con fibras continuas», *Materiales Compuestos*, vol. 2, n.º 1, ene. 2018, [En línea]. Disponible en: <https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/view/84>.

- [8] J. V. G. Sosa y A. B. Pingarrón, «Desarrollo de un material compuesto plástico (pp)-madera (aserrín) usando materias primas de reuso», p. 10, 2008.
- [9] J. C. Mora, M. Esquivel, M. Durán, y R. Zamora, «obtención y evaluación de mezclas de polipropileno con fibras de raquis de banano (musa AAA)», p. 21, 2015.
- [10] D. Castillo, A. Tovar, I. Marín, M. Vargas, M. Guancha, y C. Caicedo, «Aplicación de residuos de cáscara de huevo como alternativa de Biorelleno en compuestos de Polipropileno», p. 5, 2016.
- [11] Robert L. Mott, *Resistencia de materiales*, Quinta. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, 2009.
- [12] A. Besednjak, *Materiales Compuestos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2009.
- [13] José Ramón GIL, Barroso, y Ana María Camacho, *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. Editorial UNED, 2010.
- [14] I. M. Daniel y O. Ishai, *Engineering mechanics of composite materials*, 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- [15] O. Ishai Isaac M. Daniel, *Engineering Mechanics Of Composite Materials*, Segunda. New York H Oxfo: Oxford University Press, 2006.
- [16] J. A. G. Fernández y J. M. M. Vidales, *Corrosión en las estructuras de hormigón armado: fundamentos, medida, diagnosis y prevención*. Editorial CSIC - CSIC Press, 2007.
- [17] J. Newell, *Ciencia de materiales - aplicaciones en ingeniería*, 1.ª ed. Alfaomega Grupo Editor, 2011.
- [18] J. R. Montes, L. C. Martínez, y J. C. del R. Romero, *Procesos industriales para materiales metálicos: (2ª EDICIÓN)*. Editorial Visión Libros, 2006.
- [19] W. D. Callister Jr, *Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales*, 1.ª ed. The University of Utah: REVERTE SA, 1995.
- [20] D. Hull, *Materiales compuestos*. Reverte, 1987.
- [21] Varios. José E. Crespo Amorós, Antonio V. Nadal Gisbert, David Juárez Varón, y Varios, *Cuadernos de la investigacion en la ingeniería*, vol. I. Universitat Politècnica de València: Área de Innovación y Desarrollo, S.L., 2015.
- [22] Marta Villén, «Polipropileno: plástico seguro para nuestros productos», *Blog Conasi*, jun. 19, 2012. <https://www.conasi.eu/blog/consejos-de-salud/que-es-el-polipropileno-pp/>.
- [23] F. W. Billmeyer, *Ciencia de los polímeros*. Reverte, 1975.

- [24] L. A. Fasce, «Comportamiento mecánico de polipropileno modificado con una poliolefina elastomérica», p. 10, 2005.
- [25] «POLIPROPILENO». <http://www.plasquim.net/polipropileno.html>.
- [26] «Polipropileno», *Plásticos Químicos Industriales*. <http://www.plasquim.net/4-polipropileno.html> (accedido oct. 27, 2019).
- [27] G. R. McDonald *et al.*, «Bioactive contaminants leach from disposable laboratory plasticware», *Science*, vol. 322, n.º 5903, p. 917, nov. 2008, doi: 10.1126/science.1162395.
- [28] «Aprende a identificar los tipos de plástico nocivos para tu salud.», *Be Slow*, ene. 30, 2020. <https://be-slow.com/blogs/be-slow/aprende-a-identificar-los-tipos-de-plastico-nocivos-para-tu-salud>.
- [29] «Conozca los Plásticos: Que Significan los 7 Números», *Mercola.com*, abr. 08, 2015. <http://articulos.mercola.com/sitios/articulos/archivo/2015/04/08/uso-de-plasticos.aspx>.
- [30] «Material Docente :: ID55B-1 Materiales de Ingeniería», *U-Cursos*, mar. 12, 2007. <https://www.u-cursos.cl>.
- [31] RES, «¿Sabes cómo identificar los plásticos más habituales?», *ecointeligencia - cambia a un estilo de vida sostenible!*, ene. 20, 2014. <https://www.ecointeligencia.com/2014/01/reciclaje-plasticos-habituales/>.
- [32] APQUA, *Los Plásticos en Nuestra Sociedad: Guía Del Profesor*. Reverte, 1995.
- [33] sostenibilidad.semana.com, «¿Por qué se reciclan tapas plásticas?», *Tapas plásticas por qué se reciclan*, nov. 22, 2016. <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/tapas-plasticas-por-que-se-reciclan/36528>.
- [34] ICONTEC, *Gestión ambiental. Residuos sólidos. Guía para la separación en la fuente*. 2009, p. 18.
- [35] S. Voodoo, «Colores del reciclaje. Aprende a distinguirlos», *Canecas De Reciclaje | Proveedor de Canecas Para Reciclaje en Colombia*, ago. 01, 2019. <https://canecasdereciclaje.com/noticias/canecas-de-reciclaje-blog/canecas-de-reciclaje-por-color-segun-la-norma-tecnica-colombiana-gtc24/>.
- [36] M. M. Longhi, *Cultivo y uso del bambú en el neotrópico*. Editorial Universidad de Costa Rica, 1998.
- [37] M. Villegas, *Guadua: Arquitectura y Diseño*. Villegas Asociados, 2005.
- [38] Hidalgo Lopez Oscar, *Bamboo the gift of the gods*. Hipertexto Ltda, 2003.

- [39] Gernot Minke, *Manual de construcción con Bambú*, 1.<sup>a</sup> ed. CALI.COLOMBIA: Merlin S.E. SAS, 2010.
- [40] Ó. G. Yebra, *Caracterización del bambú Guadua ( Guadua Angustifolia ) para el diseño e industrialización en España*. Universidad Almería, 2014.
- [41] E. Salas Delgado, «Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia : Simón Velez : símbolo y búsqueda de lo primitivo», Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [42] L. F. A. Davila, «Facultad de arquitectura y diseño licenciatura en diseño industrial», p. 357, 2016.
- [43] L. F. López y J. F. Correal, «Estudio exploratorio de los laminados de bambú Guadua angustifolia como material estructural», *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 11, n.º 3, pp. 171-182, 2009, doi: 10.4067/S0718-221X2009000300001.
- [44] M. Estrada Mejía, «Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos», 2010.
- [45] D. C. Espinosa Perez, *La Cadena de la Guadua en Colombia*. Bogota: IICA, 2003.
- [46] X. Londoño, «El bambú en Colombia», *Biotecnología Vegetal*, vol. 11, n.º 3, p. 12, jul. 2011.
- [47] F. J. M. Columbrí, *Materiales y procesos avanzados: materiales de alta tecnología*. Editorial CSIC - CSIC Press, 1993.
- [48] M. Eduardo, *Los materiales cerámicos*, 1.<sup>a</sup> ed. Argentina: Tecnibook Ediciones, 2001.
- [49] E. del C. V. Malagón, *Materiales cerámicos: propiedades, aplicaciones y elaboración*. UNAM, 2005.
- [50] Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda. Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V., 2008.
- [51] Douglas C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, Segunda. Mexico: Limusa, S.A. de C.V., 2004.
- [52] Valarezo Jaramillo Luis Eduardo, «OBTENCION EXPERIMENTAL DE UN MATERIAL BIOCOPUESTO A BASE DE UNA MATRIZ POLIMERICA Y REFORZADA CON FIBRAS NATURALES DE GUADUA ANGUSTIFOLIA PROVENIENTE DEL ECUADOR», Politecnica Salesiana, Cuenca, 2013.

- 
- [53] Karen Catherine Lázaro León<sup>1</sup>, , Héctor E. Gonzáles Mora<sup>2</sup>, y y Aldo J. Cárdenas Oscanoa<sup>3</sup>, «Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno», vol. 7, p. 16, oct. 2016.
- [54] M. Mucha and Z. Królikowski, «APPLICATION OF DSC TO STUDY CRYSTALLIZATION KINETICS OF POLYPROPYLENE CONTAINING FILLERS», vol. 74, p. 9, 2003.

## **6.Anexos**



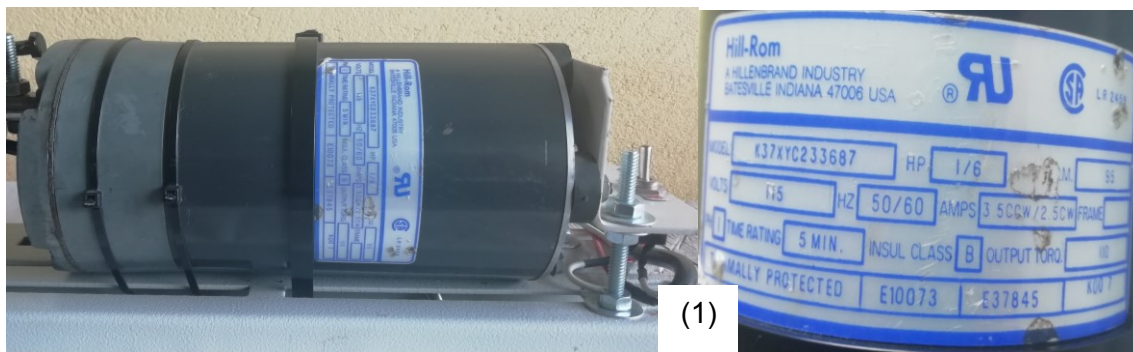


# **1. Anexo: Norma ASTM 638 – D**

## **2. Anexo: Norma ASTM 790 - D**

### 3. Anexo: Molino de bolas

Este equipo cuenta con un motor a 110 v de una potencia de 1/6 HP (1) conectado a un condensador de arranque de 20  $\mu$ F (2) el cual se encarga de determinar el sentido de giro del motor. Cuenta con un interruptor ON/OFF (3) para su arranque y esta acoplado (4) a un tubo de 3" galvanizado (5) que en su interior tiene 20 esferas de ferromanganeso con diámetros entre 2 y 4 cm las cuales se encargan del proceso de molienda (6) Este molino permitió obtener partículas de cerámica de 150 $\mu$ m (7).





## 4. Anexo: Certificado Tamiz

TEST SIEVE  
TAMIZ PARA ENSAYO

**TAMIZ**  **STANDARD**

Manufactured by **PINZUAR LTDA**

IN ACCORDANCE WITH NORM  
CONFORME CON LA NORMA  
ASTM E-11-2009

AVERAGE APERTURE	150,32	µm
ABERTURA PROMEDIO		
DIÁMETRO PROMEDIO	97,21	µm
AVERAGE DIAMETER		
MESH No. / MALLA No.	100	
SERIAL No. / SERIE No.	35175	
INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN	2.53	µm
UNCERTAINTY OF MEASUREMENT		

DATE / FECHA 2014-09-11 SING / FIRMA 



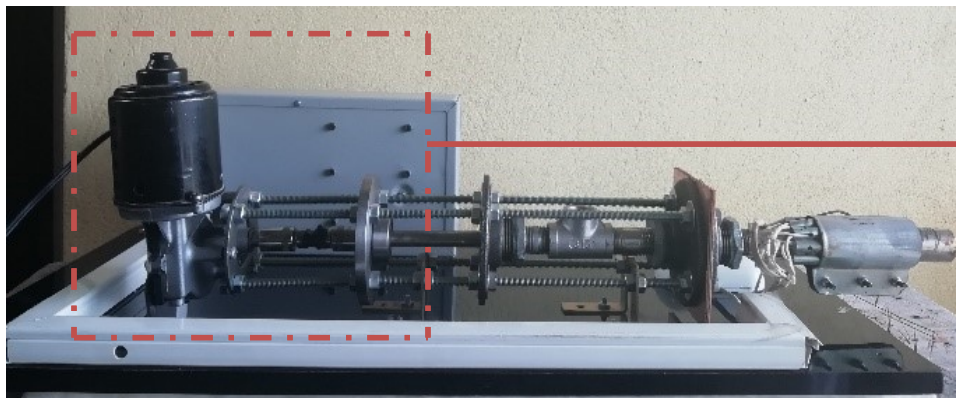
ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO  
PINZUAR LTDA TELS: (571) 415 7020 / 545 4957  
Calle 18 Número: 103 B 72  
www.pinzuar.com.co  
BOGOTÁ - COLOMBIA

## 5. Anexo: Extrusora

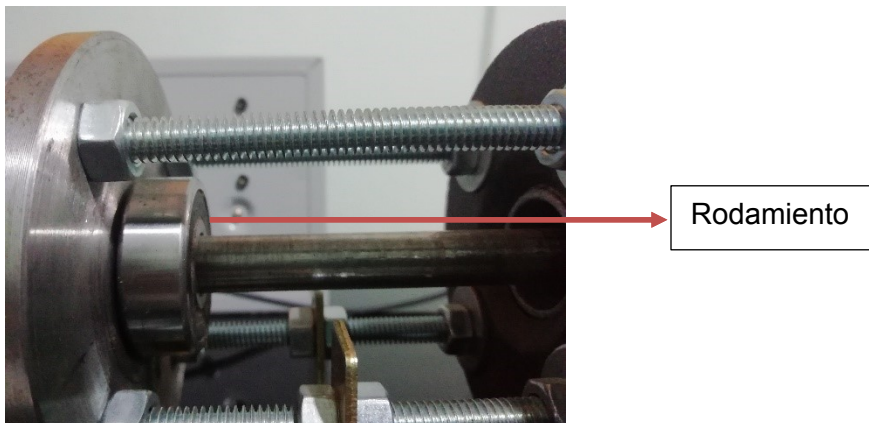
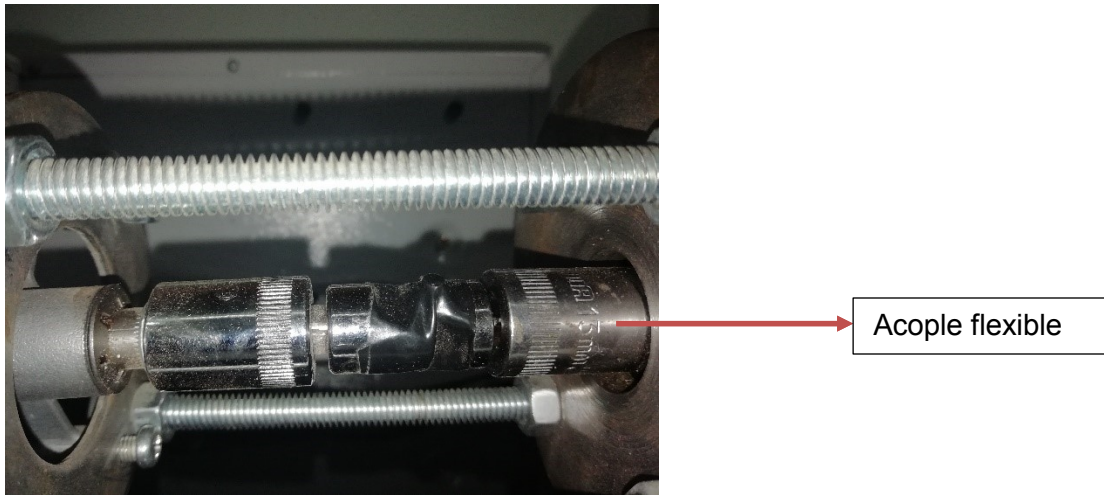
Para el desarrollo del proyecto aquí presentado se construyó una extrusora para permitir elaborar las probetas mostradas anteriormente. A continuación, se dará una descripción de las partes de esta.

Las partes de la extrusora las podemos dividir en tres grupos generales:

**1. Fuerza:** Está formada por el motor, el cual tiene una velocidad de 60 rpm, funciona a 12v, una corriente de 4 a 6 A y una potencia de 30 a 40 W. Este se encuentra acoplado al usillo de 45 cm aprox por medio de un acople flexible desmontable. Cuenta además con un rodamiento que impide que el usillo se desplace hacia atrás.

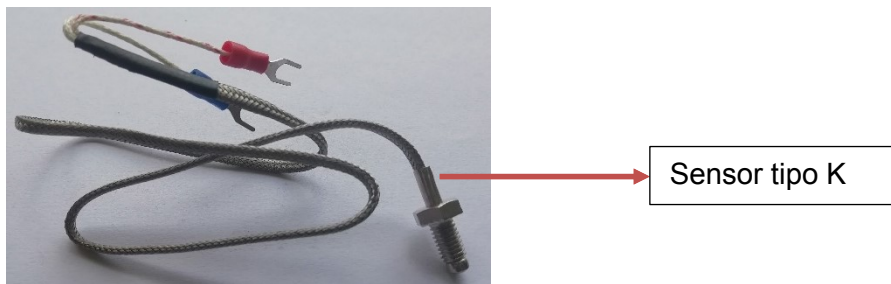
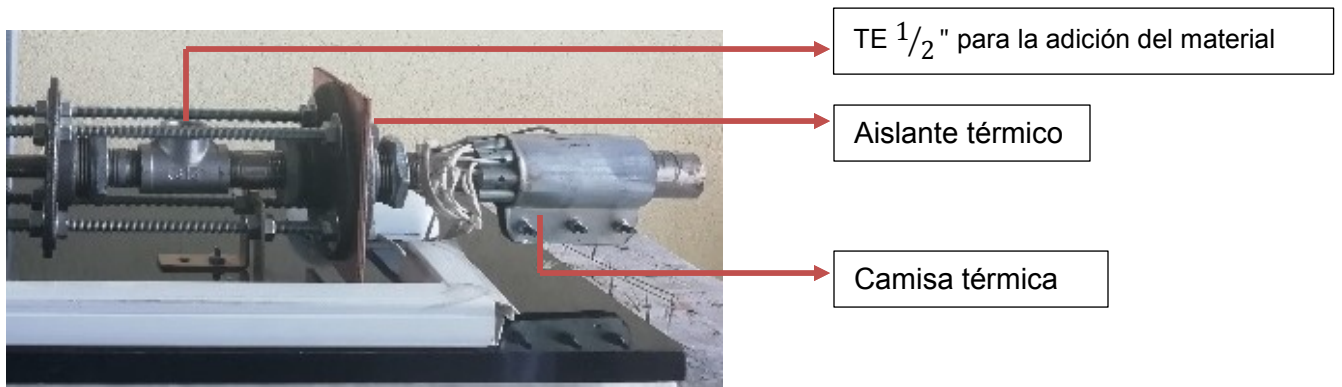


Grupo de fuerza



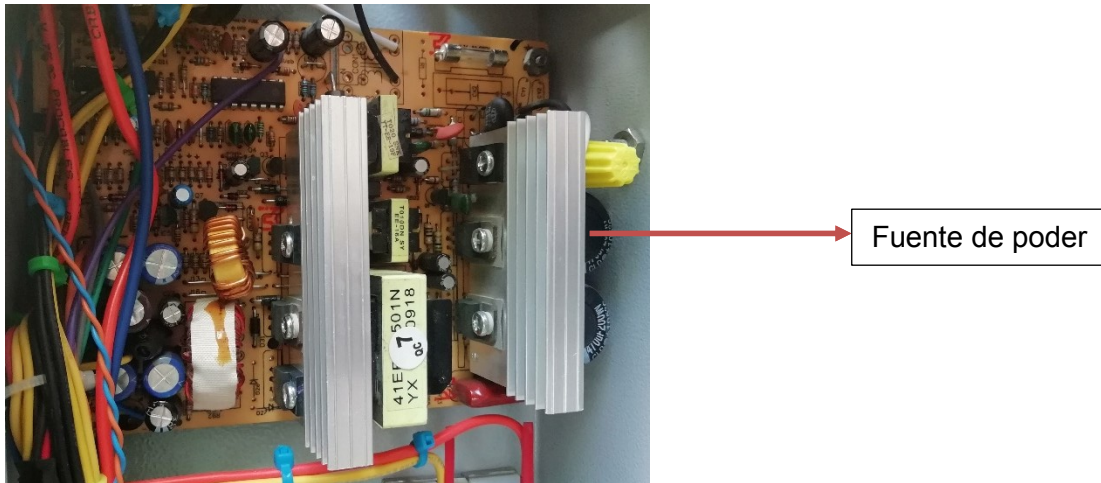
**2. Cámara de fundición:** Esta sección de la extrusora esta conformada por una TE de  $1/2$ " , permite la conexión entre la cámara de fundición y el grupo de fuerza. La cámara de fundicion inicia con una zona de aislamiento térmico compuesta por unas vaquelitas. Luego se tiene un tubo de acero inoxidable de  $1/2$ " con una longitud de 16 cm aprox al cual se conectan 7 resistencias de 40w/110v cada una, conectadas en paralelo alrededor de este. Las resistencias se encuentran cubiertas por una lámina de metal y a un lado se encuentra un sensor tipo K con una capacidad de medición de 0 a 1024°C, alimetación de 3.3 a 5v y una precisión de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ , formando asi la camisa térmica.



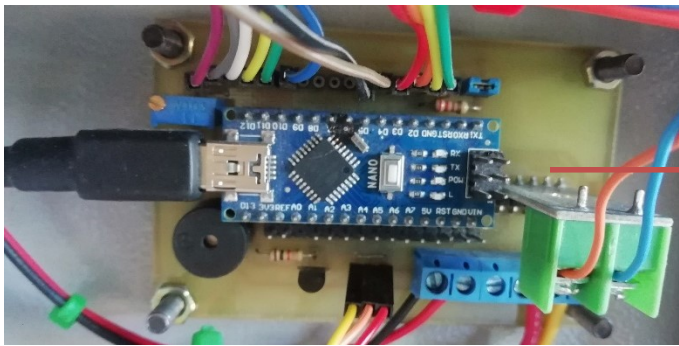


**3. Control:** la alimentación de todo el sistema se realiza con una fuente atx 750w/110v, la cuál proporciona diferentes voltajes de salida, es decir por medio de esta fuente se alimenta la tarjeta de programación de 5v y el motor de 12v.

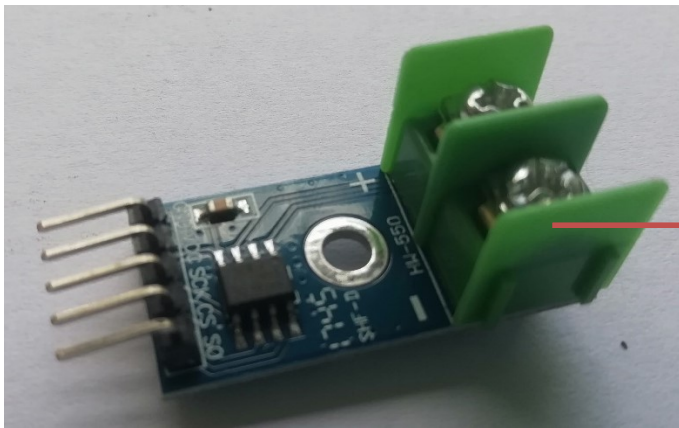




El sistema de control se realizó con una tarjeta programable arduino NANO, esta, está conectada con un transductor MAX6675 el cual nos permite transformar la señal de temperatura entregada por el sensor en una señal de voltaje que pueda ser leída por la tarjeta arduino NANO, que a su vez, va conectada con un relé de estado sólido que controla la cantidad de voltaje que debe ir a las resistencias y así manejar la temperatura de extrusión; este control se realiza por medio de un controlador PID (controlador proporcional, integral y derivativo), programado en la tarjeta arduino. La tarjeta además cuenta con una conexión a una pantalla LDC de 20\*4 la cual nos permite ver datos como la temperatura actual, la de referencia y el progreso del PID. En la caja de control se encuentra además un cable de conexión USB para poder cambiar la programación de la tarjeta si así se requiere. Para determinar la temperatura a la cual se desea manejar, se cuenta con una perilla en la parte frontal de la caja de control para graduar la temperatura.



Arduino NANO



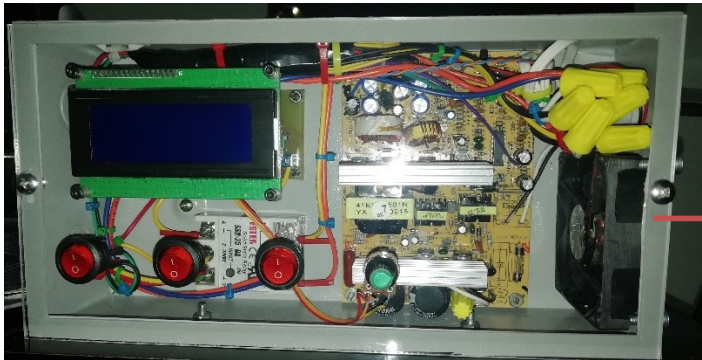
MAX6675



Relé de estado sólido



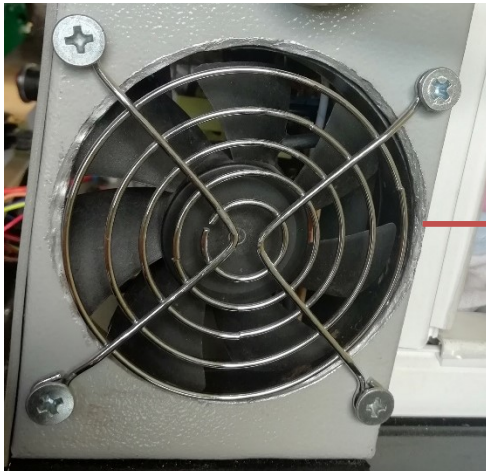
Por último la máquina cuenta con una serie de interruptores independientes para el sistema de control, la camisa térmica y el motor, esto debido a que la máquina demora un tiempo en alcanzar la temperatura a la cual debe extruir por ello, el motor debe iniciar su trabajo cuando esta temperatura sea alcanzada. Además la caja de control cuenta con un ventilador para evitar sobrecalentamiento de la fuente y al lado de la camisa de calefacción se encuentra un tomacorriente a 110v para la conexión de las resistencias de los moldes.



Caja de control



Interruptores de arranque



Ventilador para refrigeración



Tomacorriente 110v



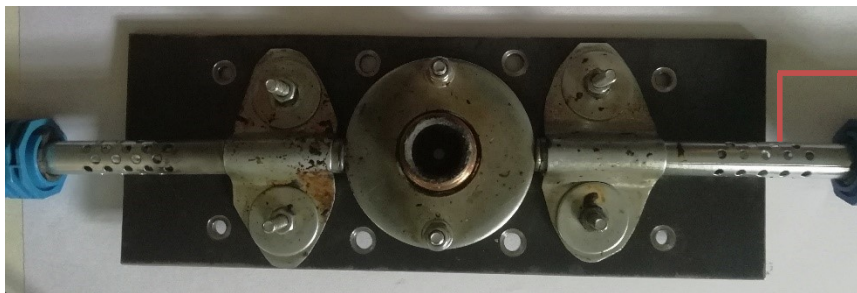
## 6. Anexo: moldes

Para la elaboración de las probetas mediante el método de extrusión se contaron con moldes en acero que permitieron obtener los dos tipos de probetas fabricadas en este trabajo. Estos moldes constan de tres partes, la (1) y (3) se elaboraron en acero 1030 y la parte (2) se elaboró en acero 1020 y se mecanizó mediante CNC con el fin de que las medidas fueran lo más exactas posibles.

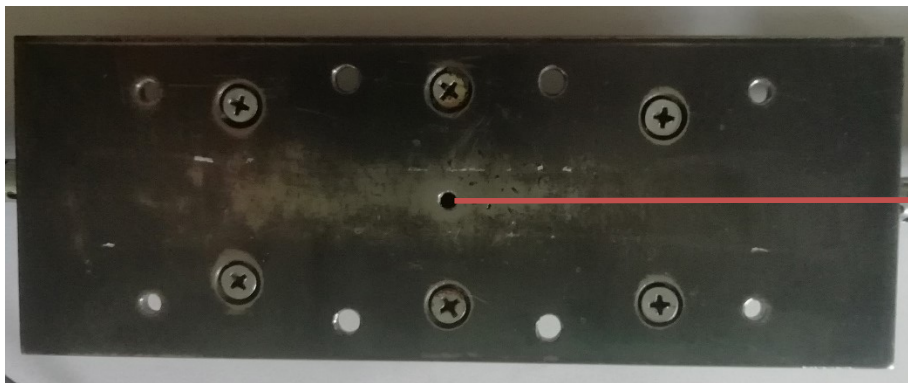
La parte (1) corresponde a una lámina de acero 1030 a la cual se añadió un tapón de bronce de  $\frac{1}{2}$ " que va conectado al final de la extrusora, para permitir el vaciado del material en los respectivos moldes cuenta con una perforación de 2 mm. Este además tiene dos resistencias de 40w/110v a los lados que permiten tener el molde a una temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, esto con el fin de evitar que el material al tocar el molde frío se cristalice impidiendo que salga el material de la extrusora.



Tapón de  
bronce  $\frac{1}{2}$ "



Resistencias  
para calentar el  
molde



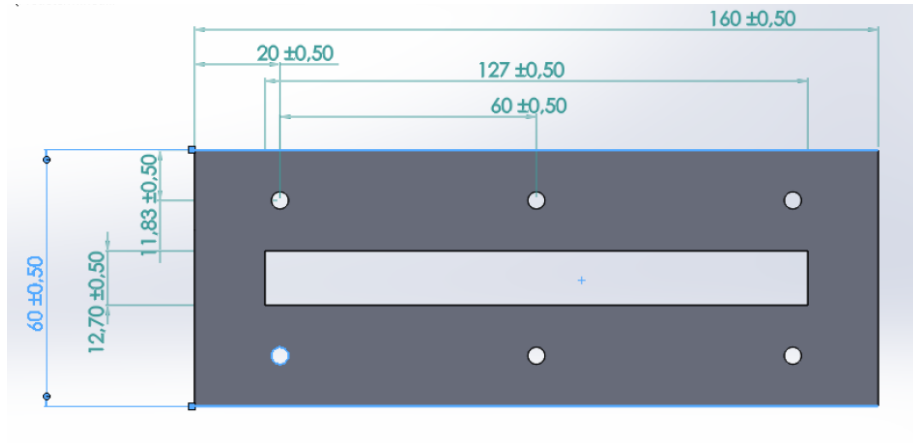
Perforación de  
vaciado

La parte (2) hace referencia a las láminas mecanizadas para obtener las probetas bajo normas ASTM tanto para tensión como para flexión, a continuación, se muestran imágenes de los moldes y las medidas bajo las cuáles se mecanizaron.

Molde probetas de flexión



Medidas norma ASTM 790D

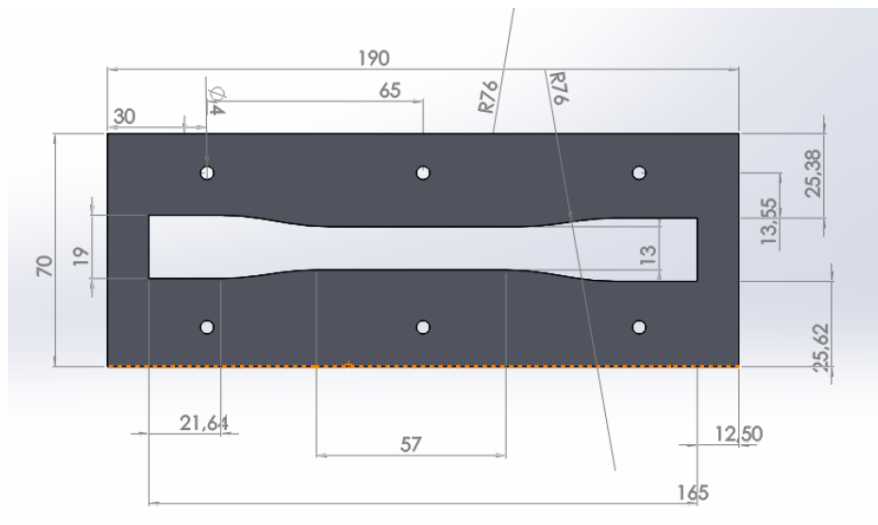


Molde probetas de tensión



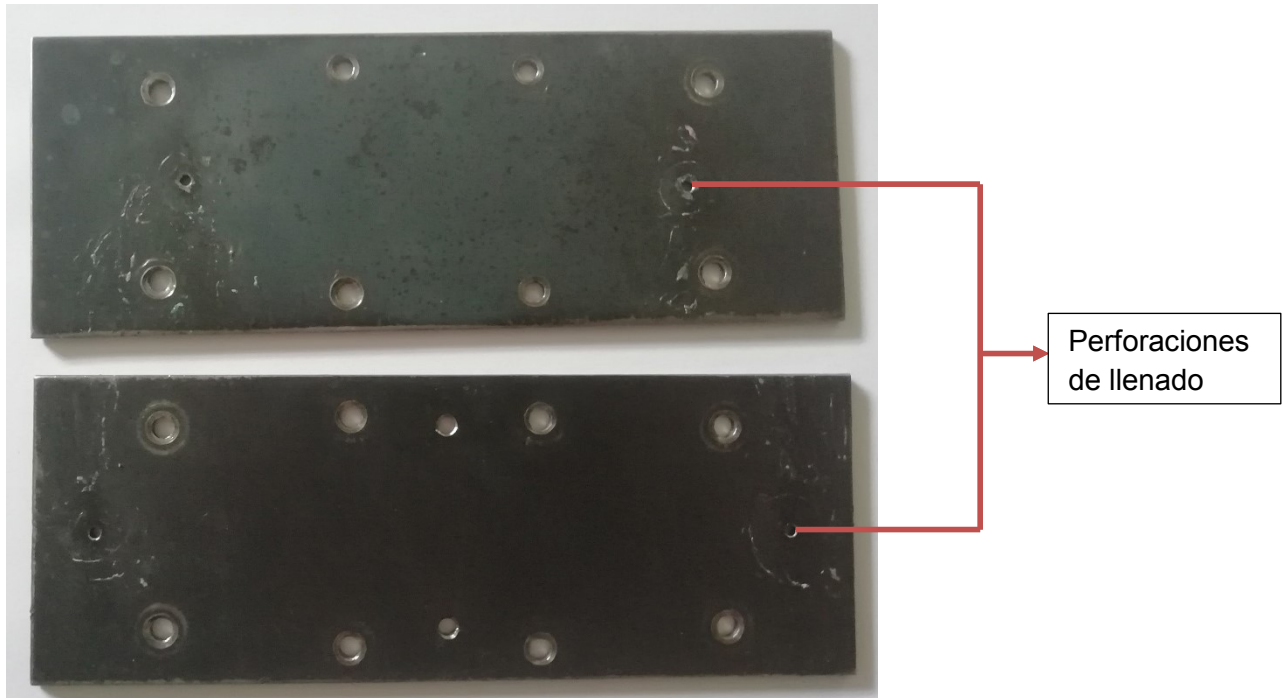
Medidas norma ASTM 638D





Al inicio los moldes se mecanizaron para sujetar con 6 tornillos, al momento de realizar las probetas se evidenció que el material se salía entre las placas por lo cual se añadieron más tornillos, los usados para sujetar los moldes son de tipo Allen de 4 mm \* 2 mm.

La parte (3) son las tapas con las cuales se sellaban los moldes, estos tenían una perforaciones cerca a la parte final de la lámina los cuales indicaban que el molde, es decir la parte (2) se había llenado, estos tenían diferente distancia entre ellos debido a que las probetas eran de diferentes longitudes.



Al escanear el siguiente código QR podrán ingresar a mi página de YouTube donde encontrarán videos relacionados a la fabricación y funcionamiento de las máquinas descritas anteriormente, además del proceso de la realización de los ensayos mecánicos.

