

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



## **TESIS**

**“MEJORAMIENTO DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LÁMINAS  
DE POLIPROPILENO CON LA ADICIÓN DE UN COPOLÍMERO DE  
POLIPROPILENO-ETILENO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**ELABORADO POR**

**EDITH CLARA SÁNCHEZ MORENO**

**ASESOR**

**Dr. EDGAR WALDO NORABUENA MEZA**

**LIMA – PERÚ**

**2023**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi padre Luis Alberto Sánchez y a mi madre Mirian Maribel Moreno Torres, que siempre estuvieron conmigo, en cada una de mis etapas, a mi sobrina Zoe Luhana y mi prima Nicole Sánchez, las pequeñas de casa, con el ánimo de verlas en un futuro, profesionales. A mi pareja Alberto Palmou y familia que estuvieron en este proceso de tesis, apoyándome en todo.

### **Agradecimiento**

Agradecer por darme toda la sabiduría y perseverancia, a Dios, a mis padres Luis Alberto Sánchez Salinas y Mirian Maribel Moreno Torres, a mi asesor Edgar Norabuena y cada una de las personas que colaboraron de una u otra manera a poder realizarlo.

## Resumen

La aplicación de componentes naturales poliméricos se usa a nivel mundial para diferentes fines comerciales, envases, bolsas, en la industria automotriz, construcción, química, entre otros. Es por ello que el desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación y mezclado, e incorporación de otros polímeros para mejoras de productos, brindado un amplio campo de investigación en el desarrollo de procesos en los últimos años. Unos de los casos de estudio presente es la combinación de copolímero de propileno-etileno con polipropileno (PP) Con el fin de mejoras las propiedades físicas y mecánicas de las láminas de propileno utilizadas en la fabricación de techos, como la resistencia al impacto y rendimiento a bajas temperaturas.

El trabajo de titulación profesional, tiene como objetivo la mejorar las propiedades físico-mecánicas de las láminas de polipropileno puro al adicionar copolímeros randómicos. Para ello se hará uso de láminas de polipropileno convencionales las cuales suelen ser manipuladas para la construcción de techos, para obtener los resultados esperados estas fueron llevadas desde su estado puro hacia la formulación con materia prima, Polipropileno (PP), aditivo UV y carbonato de calcio peletizado, y adicionando de polipropileno-etileno en 5%, 10% y 15% p/p, para verificar el comportamiento y las mejoras del material ante los impactos a bajas temperaturas. La investigación experimental fue segmentada en 4 etapas metodológicamente, desde el pretratamiento de las materias primas, hasta la elaboración de las láminas de muestras con la mezcla ya preparada, siguiendo con la ejecución de los ensayos pertinentes, ensayo de tracción, dureza e impacto, su evaluación de acuerdo a la resistencia y la selección de la mejor mezcla de acuerdo a la cantidad y proporción optima de copolímero agregado.

**Palabras claves:** Copolímero, láminas, techos, polipropileno

## Abstract

The application of natural polymeric components is used worldwide for different commercial purposes, packaging, bags, in the automotive, construction, and chemical industries, among others. That is why the development of new manufacturing and mixing technologies, and the incorporation of other polymers for product advantages, have provided a wide field of research in process development in recent years. Some of the case studies present the combination of propylene-ethylene copolymer with polypropylene (PP) in order to determine the physicals and mechanical properties of the propylene sheets used in the manufacture of roofs, such as impact resistance and performance at low temperatures.

The present degree work aims to improve the physical-mechanical properties of pure polypropylene sheets by adding random copolymers. For this, conventional polypropylene sheets will be used, which are usually manipulated for the construction of roofs, to obtain the expected results these were taken from their pure state to the formulation with raw material, Polypropylene (PP), UV additive and carbonate of pelletized calcium, and adding polypropylene-ethylene at 5%, 10% and 15% p/p, to verify the behavior and improvements of the material against impacts at low temperatures. The experimental investigation was segmented into 4 methodological stages, from the pretreatment of the raw materials, to the preparation of the sample sheets with the already prepared mixture, continuing with the execution of the relevant tests, tensile, hardness and impact tests, sur evaluation according to the resistance and the selection of the mixture according to the amount and optimal proportion of added copolymer.

**Keywords:** Copolymers, sheets, ceilings, polypropylene

## Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	i
Agradecimiento .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Tabla de Contenido.....	v
Índice de tablas .....	viii
Índice de figuras .....	ix
<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación.....	1
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Antecedentes investigativos.....	4
1.5 Hipótesis .....	6
1.5.1 Hipótesis General .....	6
1.5.2 Hipótesis Específicas.....	6
<b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....</b>	<b>7</b>
2.1. Bases Teóricas .....	7
2.1.1. Polipropileno .....	7
2.1.2. Características del polipropileno .....	9
2.1.3. Temperatura de Transición vítrea.....	9
2.1.4. Proceso de fabricación del polipropileno .....	10
2.1.5. Proceso de Obtención de Polipropileno.....	13
2.1.6. Propiedades fisico-mecánicas del polipropileno .....	14

2.1.7.	Resistencia al impacto .....	16
2.1.8.	Dureza.....	16
2.1.9.	Módulo de tracción.....	17
2.1.10.	Otras propiedades de los polímeros.....	17
2.1.11.	Tipos de fallas que puede sufrir el polipropileno .....	18
2.1.12.	Copolímero de polipropileno-etileno .....	20
2.1.13.	Uso de Carbonato de Calcio .....	23
2.2.	Marco Legal .....	23
CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACION .....		24
3.1.	Naturaleza de la investigación .....	24
3.2.	Materiales.....	24
3.2.1.	Ensayos físicos .....	25
3.2.2.	Ensayo reológico índice de fluidez.....	29
3.3.	Parte Experimental.....	31
3.3.1.	Obtención y preparación de las muestras .....	31
3.3.2.	Ensayos mecánicos .....	36
3.4.	Balance de Materia y Energía.....	48
3.4.1.	Diseño de Ingeniería.....	48
3.4.2.	Balance de Materia .....	51
3.4.3.	Balance de energía.....	56
3.4.4.	Rendimiento producción del polímero + copolímero random .....	62
3.5.	Análisis Económico .....	62
3.5.1.	Requerimientos del proyecto.....	63
3.5.2.	Análisis de costos .....	63
CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....		67
4.1.	Análisis de ensayos físicos-mecánicos .....	67
4.1.1.	Ensayo de tracción.....	67

4.1.2. Ensayo de dureza.....	69
4.1.3. Ensayo de impacto.....	71
4.2. Comportamiento a fractura con la disminución de la temperatura.....	74
4.3. Discusión de ensayos físicos-mecánicos .....	75
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES .....	81
BIBLIOGRAFIA.....	82
ANEXOS .....	86

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Propiedades físicas del polipropileno .....	15
<b>Tabla 2</b> Propiedades mecánicas del polipropileno.....	16
<b>Tabla 3</b> Formulaciones de Polipropileno Copolímero.....	25
<b>Tabla 4</b> Determinación de la densidad.....	27
<b>Tabla 5</b> Determinación de la absorción de humedad.....	28
<b>Tabla 6</b> Condiciones de pruebas seguras para materiales seleccionados .....	29
<b>Tabla 7</b> Índice de fluidez de materia prima .....	31
<b>Tabla 8</b> Dimensiones promedio de las probetas .....	37
<b>Tabla 9</b> Especificaciones del tornillo extrusión.....	50
<b>Tabla 10</b> “Propiedades del aire a 1 atm a 125 °C” .....	59
<b>Tabla 11</b> “Número Nusselt para convección natural sobre superficies” .....	60
<b>Tabla 12</b> Requerimientos del proceso.....	63
<b>Tabla 13</b> Costos de inversión.....	64
<b>Tabla 14</b> Costos de Operaciones .....	64
<b>Tabla 15</b> Detalle presupuestal.....	65
<b>Tabla 16</b> Resultados de la prueba de tracción .....	67
<b>Tabla 17</b> Imágenes de las probetas antes y después del ensayo .....	69
<b>Tabla 18</b> Resultados de Dureza .....	70
<b>Tabla 19</b> Valores del ensayo a Impacto a T=0°C (Sin cámara de degradación) .....	71
<b>Tabla 20</b> Valores del ensayo a Impacto a T=23°C (Sin cámara de degradación) .....	72
<b>Tabla 21</b> Valores del ensayo a Impacto a T=23°C (con cámara de degradación).....	73
<b>Tabla 22</b> Comparación ensayo de tracción con diferentes porcentajes de copolímero .....	74
<b>Tabla 23</b> Comparación ensayo de dureza con diferentes porcentajes de copolímero .....	74
<b>Tabla 24</b> Comparación ensayo de impacto con y sin cámara de degradación.....	75

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Comportamiento PVT del polipropileno .....	10
<b>Figura 2.</b> Reacción de polimerización.....	11
<b>Figura 3.</b> “Diagramas de bloques de procesos de polimerización” .....	12
<b>Figura 4.</b> Diagramas de Flujo Proceso de Spheripol .....	14
<b>Figura 5.</b> Fallas del polipropileno.....	18
<b>Figura 6.</b> Crazing del polipropileno .....	19
<b>Figura 7.</b> Zona plástica y dúctil .....	20
<b>Figura 8.</b> Estructura de polipropileno.....	22
<b>Figura 9.</b> Copolímero Random (propileno-etileno).....	22
<b>Figura 10.</b> Polipropileno.....	24
<b>Figura 11.</b> Copolímero random de polipropileno-etileno.....	25
<b>Figura 12.</b> Determinación de la densidad de materiales sólidos .....	26
<b>Figura 13.</b> Analizador de contenido de humedad.....	28
<b>Figura 14.</b> Diámetro de gránulos.....	28
<b>Figura 15.</b> Plastómetro de extrusión.....	30
<b>Figura 16.</b> Equipo Brabender o reómetro de torque.....	32
<b>Figura 17.</b> Laminado de mezclas.....	33
<b>Figura 18.</b> Recorte de láminas .....	33
<b>Figura 19.</b> Equipo de molino .....	34
<b>Figura 20.</b> Muestras de molienda de polipropileno con adición de copolímero .....	34
<b>Figura 21.</b> Equipo carver de prensado.....	35
<b>Figura 22.</b> “Diagrama de obtención de muestras”.....	36
<b>Figura 23.</b> Dimensiones de probetas .....	38
<b>Figura 24.</b> Colocación de probeta entre extensómetros.....	39
<b>Figura 25.</b> Gráfico esfuerzo vs tiempo del ensayo de tracción.....	40
<b>Figura 26.</b> Indentador tipo D .....	41
<b>Figura 27.</b> Geometría para ensayo de dureza 125 mm x 75 mm.....	41
<b>Figura 28.</b> Durómetro shore TH210.....	42
<b>Figura 29.</b> Geometría para ensayo de impacto .....	44

<b>Figura 30.</b> Equipo Gardner para ensayo de impacto .....	45
<b>Figura 31.</b> Equipo Gardner .....	45
<b>Figura 32.</b> Equipo cámara de envejecimiento QUV .....	46
<b>Figura 33.</b> Muestras para evaluar en equipo QUV/Basic .....	46
<b>Figura 34.</b> Muestras colocadas dentro del equipo QUV .....	47
<b>Figura 35.</b> “Extrusora de laboratorio” .....	50
<b>Figura 36.</b> “Tornillo de extrusora” .....	51
<b>Figura 37.</b> “Máquina extrusora” .....	52
<b>Figura 38.</b> Gráfica de ensayo de tracción esfuerzo vs tiempo .....	68
<b>Figura 39.</b> Gráfico valores de resistencia a la tracción.....	68
<b>Figura 40.</b> “Gráfico de resistencia a la tracción con diferentes formulaciones” .....	76
<b>Figura 41.</b> “Grafico comparativo ensayo de dureza en unidades shore” .....	77
<b>Figura 42.</b> Gráfico de resistencia al impacto a 0°y 23°C .....	78

## CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

El rápido desarrollo de los materiales plásticos a nivel mundial, década tras década, ha facilitado el incremento de los usos de estos materiales en diversas áreas y aplicaciones, incluida la de la construcción, sustituyendo la implementación de otros materiales puros como el acero, otros metales y madera. El polipropileno, por su versatilidad, no ha sido descartado en esta implementación, logrando así su implementación en varias partes de la construcción, incluida la fabricación de láminas de techos para viviendas y edificaciones a nivel mundial, sustituyendo las típicas láminas de madera y de zinc utilizadas por años.

### 1.2 Descripción del Problema de Investigación

Está establecido y consolidado el polipropileno como uno de los polímeros más empleados en techos de las casas en todas las regiones de Perú en sus diferentes regiones. Este material ofrece muchas ventajas a la hora de construir la capa del techo de la mayoría de casas y edificaciones, entre ellas resalta su liviandad y bajos costos. Sin embargo, también cuenta con desventajas que no hacen factible su uso en todas las regiones y lugares del país, como la no resistencia y el quiebre del polímero termoplástico al exponerlo a bajas temperaturas, principalmente cuando estas están por debajo de 0 grados Celsius y la aparición de fuertes granizadas, como fue en el caso del distrito de Ate el 28 de mayo de 2021, cuando se vio afectado por el fenómeno DANA. Según los especialistas, el granizo fue de un tamaño menor, con 3 milímetros de diámetro (Andina, 2021). Otras de las desventajas frente a otros materiales plásticos usados en la construcción es su resistencia y durabilidad para proyectos de grandes tamaños y de gran duración en el tiempo, ejemplo de 30 a 50 años.

De acuerdo con los datos y las experiencias, la fabricación de estas láminas de polipropileno en la industria de la construcción para coberturas de techos se realiza para temperaturas ambientales cercanas a los 25 °C en forma ideal o también para temperaturas mayores a esta. “En este rango de temperatura, el material de polipropileno tiene una buena resistencia y comportamiento físico mecánico ante ensayos de impacto según la norma ASTM D-5420” (Martín, 2010)

Por otro lado, cuando se realizan variaciones de temperaturas, en particular disminuciones de estas por debajo de los 0 grados Celsius del material de polipropileno, los estudios arrojan que la resistencia disminuye a 2 Joule (Matos, Sánchez, Jiménez, Salas, & Santana, 2006)

El polipropileno (PP), es un material de naturaleza polimérica utilizado frecuentemente en la fabricación de techos de calaminas, con temperatura de transición vítrea inferior a otros materiales de igual naturaleza, siendo un material delicado para su uso por su poca resistencia a bajas temperaturas, característica que lo vuelve quebradizo.

La evaluación realizada al comportamiento del plástico como la característica mecánica y la facilidad de fractura se considera de importancia en el momento de desarrollar un diseño que abarque los requerimientos de un nuevo tipo de plástico. En el caso de láminas para construcción de techos, normalmente, se quiere encontrar un material que contenga el mínimo espesor posible, para controlar el peso de producto para la construcción final de la vivienda, además de mejorar el costo de fabricación del mismo.

Ampliando más el tema abordado, todos los materiales termoplásticos muestran defectos dependiendo de las condiciones y los ambientes a los que puedan ser expuestos. En el caso físico-mecánico, los principales defectos a estudiar son las fisuras y la fractura del material de plástico, donde se busca evaluar las grietas críticas que generan la ruptura inminente del material debido a una carga aplicada que supera el valor crítico y demás grietas menores que tienden a aumentar hasta que destruyen toda la unidad plástica (Gamez, 2017)

De esta manera, y con lo explicado anteriormente, es importante en cualquier estudio de análisis de propiedades físico-mecánicas de un termoplástico aplicar las técnicas y los ensayos de la mecánica de fractura, que logre así definir la tenacidad del material y simultáneamente evaluar cómo esta propiedad se va viendo afectada por diversas variables tales como la temperatura, el impacto en el material, entre otras.

Situando la problemática en el contexto nacional, realizados los estudios observacionales y presenciales directamente en zonas del sur del Perú, específicamente en los departamentos de Cusco y Puno, donde se tienen temperaturas muy bajas en periodos largos durante el año con la presencia de heladas y granizadas, se ha registrado y verificado lo establecido en los estudios previos hechos en laboratorio. En ese sentido, se registra cada año, en los periodos de mayo a septiembre, un número considerable de daños a vidrios y techos de láminas de

polipropilenos en las casas, provocado por granizadas que aumentan con respecto a décadas anteriores debido al cambio climático.

El granizo es un problema muy real y grave en estas zonas de Perú, con grandes alturas y bajas temperaturas donde se da con gran regularidad al caer las tormentas, que no solo dañan los techos construidos con láminas de polipropileno puro con el impacto de los fragmentos de hielo y la fractura de manera excesiva del plástico, sino también daña las cosechas y hiere a los animales y las personas. Asimismo, dicha problemática les genera a los pobladores una gran cantidad de perjuicios económicos y gastos adicionales en la reparación cada año de sus techos de polipropileno opacos o transparentes. A pesar de lo anterior expuesto, hay que tener en cuenta la versatilidad y amplitud de la industria petroquímica e industria de plásticos, que permite una mezcla de diferentes polímeros y la obtención expedita y barata de nuevos plásticos con mejores propiedades que los materiales en su estado puro o al 100% de un solo componente.

Actualmente, las PYMES del plástico desarrollan innovaciones en las diferentes mezclas de polímeros, para mejorar sus propiedades y ampliar las aplicaciones de estos con mejores rendimientos y bajos costos. Usualmente, para mejorar las propiedades físico-mecánicas del polipropileno, se utiliza un refuerzo elastomérico, que se basa en agregar un segundo polímero mucho más dúctil, lográndose esto a través de un mezclado en fundido o por copolimeración, alterando así los micro elementos de deformación originales del polipropileno.

El etileno-propileno, como copolímero de impacto que ha sido constatado en estudios previos, tiene a temperaturas ambiente y menores una alta resistencia de impactos. Por tal motivo, puede ser factible la utilización de este copolímero de manera porcentual para la solución y mejora de propiedades físicas respecto a las láminas de polipropileno utilizadas en la construcción de techos en zonas frías del sur del Perú.

Utilizando y tomando provecho del anterior argumento, se plantea el actual trabajo de investigación, que busca mejorar las propiedades físico-mecánicas de láminas de polipropileno puro empleadas para la fabricación de techos adicionando copolímeros randómicos. Las láminas de polipropileno convencionales utilizadas para la construcción de techos llevan en su formulación Polipropileno (PP), aditivo UV y carbonato de calcio peletizado. En el presente estudio, se plantea adicionar un copolímero de polipropileno-

etileno en 5%, 10% y 15% p/p, para verificar el comportamiento y las mejoras del material ante los impactos a bajas temperaturas.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Mejorar las propiedades de tipo físico-mecánicas de láminas de polipropileno para coberturas de techos con la adición de un copolímero de polipropileno-etileno.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar propiedades físicas como densidad, absorción de humedad y reológica como índice de fluidez de las láminas de polipropileno para techo adicionando un copolímero de polipropileno-etileno en porcentajes de 5, 10 y 15%.
- Mejorar propiedades mecánicas, tales como, resistencia al impacto, a temperatura ambiente 23°C y 0°C, así mismo, realizar un comparativo de resistencia al impacto exponiendo las muestras en una cámara de envejecimiento a las láminas de polipropileno para techo adicionando un copolímero de polipropileno-etileno en porcentajes de 5, 10 y 15%.
- Determinar la cantidad y proporción óptima de los componentes de un copolímero de polipropileno-etileno para la mejora de las propiedades físicas y propiedades mecánicas.

### **1.4 Antecedentes investigativos**

#### **Antecedentes internacionales**

El polipropileno también puede ser reciclado y utilizado en otras aplicaciones más allá de solo desecharlo. Igualmente, este polipropileno reciclado puede mejorarse con la adición de copolímeros. Se ha demostrado que, realizando una adición de un polietilenotereftalato en varios porcentajes y agregando un agente acoplante llamado anhídrido ftálico, se obtuvo que el resultado de la combinación de polipropileno y polietileno tereftalato mostró una mejora

de 8% en la resistencia al esfuerzo de tracción y de 56% en la tenacidad y dureza, para un porcentaje óptimo de polietileno tereftalato de 30%” (Poalacin, 2019).

Al combinar diferentes materiales con características plásticas, se puede originar un nuevo elemento de utilización estructural que sirva para un sistema o edificación en techos inclinados. La finalidad de esta combinación es ofrecer propiedades básicas de resistencia y durabilidad y así ser considerado como un material de calidad para un techo inclinado. Este material podría sustituir al combinar material orgánico con el polipropileno, una opción económica y de largo plazo para techos de viviendas de bajo nivel social y económico de regiones pobres de Guatemala, sin la necesidad de reemplazo o mantenimiento constante (Ramos, 2018).

### **Antecedentes nacionales**

Actualmente, gracias a una cultura ecologista, se han realizado algunas investigaciones en el Perú que promuevan el uso de materiales orgánicos con termoplásticos establecidos y así dar un uso más orgánico a estos materiales químicos. En ese sentido, en Arequipa se buscó mezclar fibras de talla de la planta de plátano para mejorar las propiedades del polipropileno a bajas temperaturas. Asimismo, se logró elaborar un compuesto de polipropileno con diferentes porcentajes de la fibra orgánica, observándose resistencia al impacto mayores en el material resultante a temperatura de -15 grados Celsius (Rosado y Elena, 2018).

Debido a la cultura ecologista, se han realizado algunas investigaciones en el Perú que promuevan el uso de materiales orgánicos con termoplásticos establecidos y así dar un uso más orgánico a estos materiales químicos. En ese sentido, en Arequipa se buscó mezclar fibras de talla de la planta de plátano para mejorar las propiedades del polipropileno a bajas temperaturas. Asimismo, se logró elaborar un compuesto de polipropileno con diferentes porcentajes de la fibra orgánica, observándose mejoras en la resistencia por impacto del material resultante a temperatura de -15 grados Celsius. (Araoz ,2018)

La distribución y configuración en láminas y placas delgadas de diferentes espesores que fueron fabricadas mediante componentes basados en polipropileno: un homopolímero isopolipropileno y tres copolímeros en bloque etileno-propileno, mediante los cuales uso 3 procesos de fabricación diferentes, la importancia de realizar esta caracterización de láminas y películas, viene por la representación económica en la aplicación a nivel industrial y

también el estudio de las variaciones de las propiedades al cambiar las combinaciones o factor del proceso de elaboración (Gámez, 2017).

## **1.5 Hipótesis**

### **1.5.1 Hipótesis General**

Los parámetros físico-mecánicos de las láminas de polipropileno para coberturas de techos con la adición de un copolímero de polipropileno-etileno mejoran a bajas temperaturas.

### **1.5.2 Hipótesis Específicas**

- La resistencia al impacto a temperatura de ambiente (23°C) de las láminas de polipropileno para techo aumentan adicionando un copolímero de polipropileno-etileno en 15%, utilizando como referencia “la norma ASTM D 5420 - 04” (ASTM International, 2004).
- La tendencia a fractura de las láminas de polipropileno se reduce con la disminución de temperatura, adicionando un copolímero de polipropileno-etileno, utilizando como referencia “la norma ASTM D 5420 – 04”. (ASTM International, 2004)
- Los parámetros físicos y mecánicos en polipropileno con adición del copolímero mejora, en cuanto al ensayo de dureza en referencia a “la norma ASTM D 2240 - 05” (ASTM International, 2005) y “El ensayo de tracción en referencia a “la norma ASTM D 638 -03” (ASTM International, 2003), al adicionar 10% de copolímero a la mezcla.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1. Bases Teóricas

#### 2.1.1. Polipropileno

El polipropileno, también denominado PP por sus siglas, es un polímero termoplástico, su obtención viene dada por medio de la polimerización del propileno, el cual es a su vez un producto derivado de la refinación en la industria del petróleo, el proceso de lleva a cabo utilizando catalizadores, con control constante de temperatura y presión. Dicho termoplástico pueden dividirse en los siguientes tipos: homopolímero, copolímero random y copolímero de alto impacto, estos se pueden modificar y adaptar dependiendo del uso final del consumidor (Caicedo et al., 2017).

Los homopolímeros son polímeros obtenidos de un solo tipo de monómero, donde los productos obtenidos con este tipo de material específicamente muestran cierta rigidez, gran dureza y soportan resistencia a ser deformables por cambios de temperatura. Por su parte, los copolímeros de alto impacto son aquellos en bloques de etileno-propileno, reflejan resistencia superior al impacto, incluyendo temperaturas inferiores a la ambiental. Los productos resultantes de este tipo de compuesto presentan un rango de resistencia desde moderada a muy alta, gran porcentaje de goma y buena resistencia al impacto en temperaturas muy inferiores a las ambientales. Dentro de este grupo de compuesto químico, existe el 2240P, el cual es un material de impacto intermedio, gran rigidez y resistencia superior a la deformación por calor. Por último, se encuentran los copolímeros random, estos se caracterizan por tener un grado pequeño de cristalinidad comparado con los homopolímeros, presentando un rango alto de fundido, gran transparencia y resistencia al impacto a temperatura ambiente (Caicedo et al., 2017).

El polipropileno es un polímero vinílico donde uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo. Desde el punto de vista industrial, es un polímero lineal cuya cadena principal es una cadena de hidrocarburos saturados, donde cada dos átomos de carbono de esta cadena principal están ramificados en un grupo metilo (CH<sub>3</sub>). En base a este aspecto, se distinguen tres formas isómeras del polipropileno: isotáctica, sindiotáctica y atáctica. Las diferencias existentes entre una y otra están en la posición de los grupos metilo-CH<sub>3</sub> con respecto a la estructura espacial de la cadena del polímero (Fabre et al., 2017).

Particularmente, las formas isotácticas y sindiotácticas pueden tender una disposición espacial característicamente ordenada y semicristalina al estar en estado sólido, lo que atribuye al material unas de las propiedades físicas originales. En la industria los procesos se encuentran dirigidos a la producción de polipropileno isotáctico, ya que se ha encontrado un interés en el valor comercial del mismo” (Araoz, 2018).

El aporte de este trabajo de investigación, es mejorar las propiedad del material para el uso en techos de polipropileno, los techos son la cubierta de una edificación o construcción que se soporta sobre el lecho estructural de la edificación, el fin de los mismos es dar protección al interior de las construcciones de los agentes climáticos exteriores, se tiene que estos son transitables cuando la pendiente de estos es igual o menor del quince por ciento (15%) y se ubiquen en la última losa del edificio, si la pendiente por su parte es superior a los quince por ciento (15%) o mayor y se soporten sobre materiales como estructuras de madera o metálicas, son considerados no transitables. (Ramos, 2018)

Con el fin de proveer el soporte sobre los cuales descansarán los techos, comúnmente se construyen estructuras de diferentes morfologías y en materiales diversos, entre los cuales destacan la madera, el acero y el hormigón. Por su parte, el techo es construido con materiales de naturaleza variable, los cuales pueden ser de, fibrocemento, arcilla, acero, aluminio, policloruro de vinilo, policarbonato, polietileno y polipropileno (Ramos, 2018)

#### **2.1.1.1. Techos a base de polímeros**

Actualmente, la industria de la construcción ha venido evolucionando a pasos agigantados y uno de los sectores que ha presentado mayor diversificación es el correspondiente a las cubiertas o techos, los cuales hoy en día se fabrican comercialmente con materiales más livianos, reciclables y fáciles de instalar, al mismo tiempo que proveen la misma seguridad, confort y rentabilidad. Este tipo de materiales son los que se conocen como polímeros y, por supuesto, existe todo un universo de los tipos y clases disponibles. Sin embargo, para la fabricación de techos, comúnmente se emplea el policarbonato, el polietileno y el polipropileno, los cuales, a pesar de que son plásticos muy similares, poseen características y funciones específicas bien definidas (Ramos, 2018).

Los techos elaborados con material de policarbonato se encuentran constituidos por planchas el cual suele ser resistente, ligero, de gran durabilidad durable, moldeable y de fácil tintura.

Sin embargo, es poco resistente a sustancias químicas y es susceptible a grietas. Por su parte, el polietileno, utilizado en fibras para tejas, es uno de los plásticos más robustos del mercado. Es un material bastante flexible que tiende a estirarse de manera fácil, este posee una mayor flexibilidad que el policarbonato y cuenta con gran resistencia a la fricción, impacto y deterioro, pero con susceptibilidad a temperaturas superiores. Se tiene también que los techos en polipropileno como material liviano, suelen mantener una temperatura ideal en el interior, sin embargo, se tiene que son flexible que el polietileno. Dadas la composición de elementos, tienden a empaquetar el sonido que se produce al chocar las precipitaciones de lluvia y granizo. Además, el techo en polipropileno es considerado el sustituto de las láminas de zinc por excelencia, ya que, por lo general, se encuentra dentro de los materiales de bajo costo, brindando en el mercado una relación de costos versus beneficio óptimo (Ramos, 2018)

### **2.1.2. Características del polipropileno**

Es compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y utilizado en diferentes aplicaciones comerciales, es un material plástico con un peso específico más bajo ( $0.9 \text{ gr/cm}^3$ ), impide la transferencia de humedad, por lo que puede utilizarse para la protección de alimentos, tiene buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia, con una óptima relación coste/beneficio, tiene una elevada estabilidad térmica que permite trabajar con el compuesto durante un largo período de tiempo a una temperatura de  $100^\circ\text{C}$  en el aire, resistente al agua hirviendo, lo que le permite estabilizarse a temperaturas de hasta  $140^\circ\text{C}$  sin presentar problemas de deformación, es un material que se degrada cuando expuesto a radiación ultravioleta prolongada o en contacto con hidrocarburos clorados, alifáticos y aromáticos. Aunque es inflamable el propileno se puede producir con aditivos retardantes y a temperatura de transición vítrea (de  $-10^\circ\text{C}$  a  $-20^\circ\text{C}$ ) presenta una menor resistencia al impacto. (Caicedo et al., 2017)

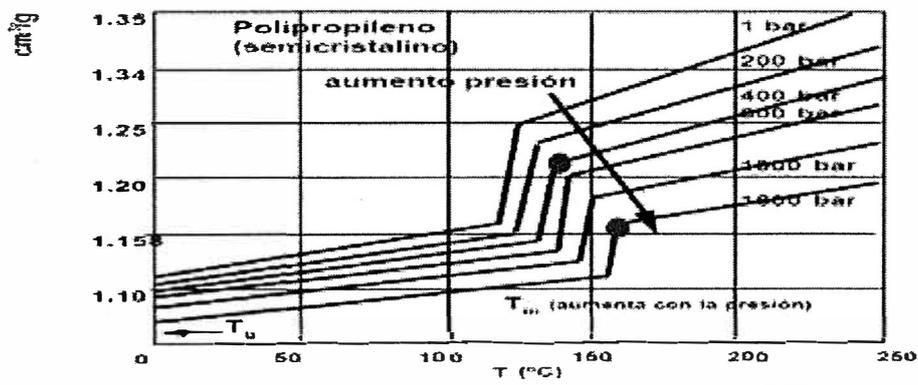
### **2.1.3. Temperatura de Transición vítrea.**

Al estar a temperatura ambiente, hay fenómenos que ocurren dentro de los materiales de PP, como la transición dúctil-frágil del PP. Matos et al. (2006) explican que esto se produce debido a que esta temperatura ( $T_g$ ) se localiza alrededor de los  $0^\circ\text{C}$ , pudiendo limitar de manera seria características mecánicas para variedad de aplicaciones. Se entiende la

transición vítrea como el cambio reversible que sufre un polímero amorfo (zonas amorfas de un polímero de carácter semicristalino), al pasar de un estado viscoso o flexible a un estado de rigidez y sensible a roturas (Todo en Polimeros, 2016), ocurriendo a una temperatura denominada temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).

En esta temperatura, las propiedades físicas del polímero pueden cambiar de ser semejante al cristal a moldearse como un material elástico. Al aumentar la temperatura por encima de  $T_g$ , las propiedades eléctricas y mecánicas se ven significativamente degradadas, considerando la misma como un rango de temperaturas que depende de las condiciones y el método a aplicar.

Un polímero es frágil y rígido, si se encuentra por debajo de la  $T_g$ , por encima de la misma es elástico y gomoso, podemos ver en la Figura 1, el comportamiento de la presión (P), volumen (V) y temperatura (T) de un polipropileno semicristalino.



**Figura 1. Comportamiento PVT del polipropileno**

*Nota.* En el gráfico observamos el comportamiento del polipropileno, en el cual al aumentar el volumen específico se incrementa la temperatura, pero hay un cambio en la tendencia en la temperatura de fusión ( $T_m$ ) del material semicristalino. Así mismo al aumentar la presión incrementa la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). Tomado de la revista *relación entre la  $T_g$ , "la temperatura de transición, la presión de inyección y el tiempo de enfriamiento"*, por José Ramón Leyva, 2021, Plásticos Universales.

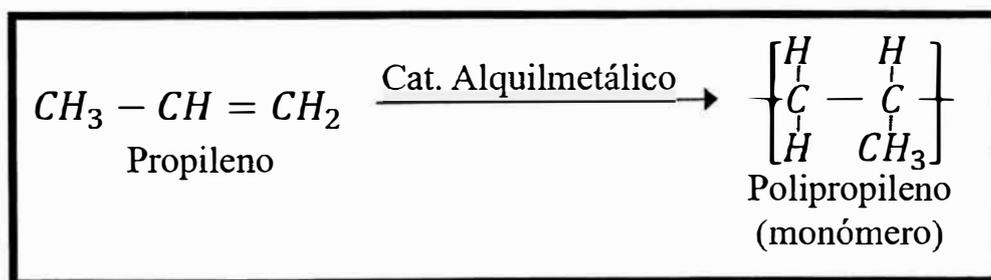
En la figura 1, se presentan dos polímeros, el amorfo solo presenta la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), en cambio los semicristalinos además de presentar la  $T_g$  presenta la temperatura de fusión de los cristales ( $T_m$ ). Estos procesos son endógenos por cuanto se absorben energía.

#### 2.1.4. Proceso de fabricación del polipropileno

Es posible mediante la presencia de catalizadores alquimetálicos en la polimerización en el propileno. Estructuralmente, se tiene un polímero vinílico el cual se puede conseguir desde el monómero propileno, por polimerización Ziegler-Natta y mediante la polimerización catalizada por metallocenos (Araoz, 2018).

El proceso de polimerización Ziegler-Natta es un mecanismo donde se utiliza el catalizador Ziegler-Natta a bajas presiones, produciendo un polietileno que presenta diferentes propiedades, debido a la mayor linealidad del polímero y la distribución del peso molecular. Por su parte, la polimerización catalizada por metallocenos es uno de los procedimientos más novedosos para la fabricación de polímeros vinílicos a partir de la producción de los procesos Ziegler-Natta, siendo los metallocenos compuestos formados por un ion metálico cargado positivamente ubicado entre dos aniones de la familia de los ciclopentadienilos.

El polipropileno, PP, es un termoplástico el cual es obtenido a partir de la sintetización por la polimerización del propileno como podemos ver en la Figura 2, una mono-olefina de tres átomos de carbono.



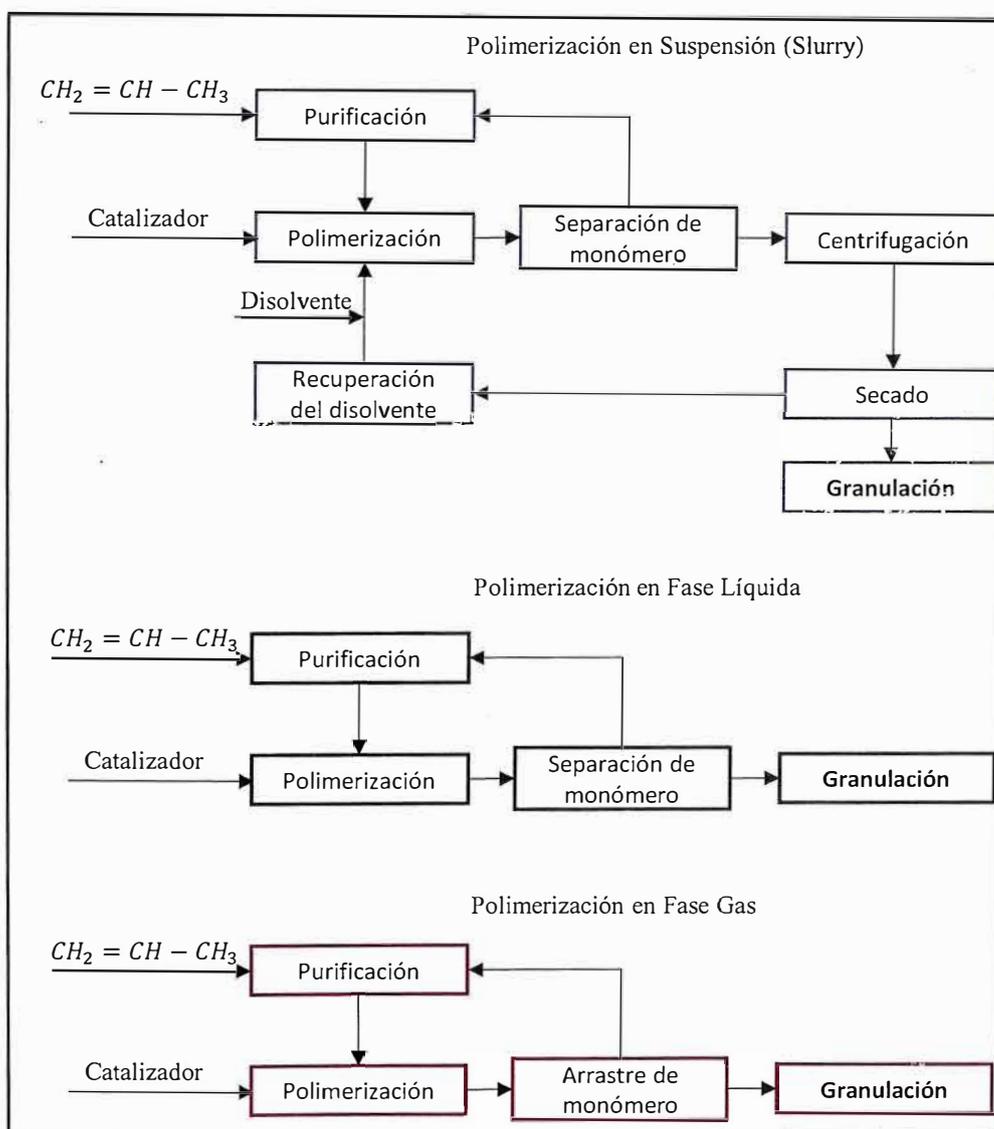
**Figura 2.** Reacción de polimerización  
*Nota.* Tomado de Martín (2010).

Existen varios procesos de fabricación del polipropileno. Sin embargo, estos se encuentran clasificados en función del medio al cual estos tienen reacción y la temperatura a la cual son producidos, como podemos ver los procesos en la Figura 3:

- **Procesos en solución**, procesos en el cual la polimerización surge en el base de un solvente hidrocarbonado utilizando la temperatura de fusión por encima de la que rige el polímero, presentando la ventaja de la una facilidad de transición entre grados gracias a la dimensión reducida en los reactores que se utilizan.
- **Procesos en suspensión**, en estos se configuran para que la reacción se realice dentro de un hidrocarburo líquido, dado que el material de polipropileno es muy poco

soluble y además de manejar una temperatura por debajo de la de fusión de este. En estos procesos se presentan diferencias bien marcadas en la configuración de los reactores y en el tipo de disolvente aplicado, afectando las propiedades de la operación y el margen de productos que pueden ser producidos.

- **Procesos en fase gas**, se caracterizan en la ausencia de solvente en el reactor de polimerización, presentando el beneficio de que pueden emplearse con comodidad en la fabricación de copolímeros de alto contenido de etileno.



**Figura 3.** "Diagramas de bloques de procesos de polimerización"

Nota. Tomado de Martín (2010).

Procesos de obtención de polipropileno. En forma de redacción resume lo posterior

### **2.1.5. Proceso de Obtención de Polipropileno**

La obtención de polipropileno se puede realizar a través de varios procesos, entre los más conocidos tenemos:

La destilación a partir de GLP siendo uno de los procesos más utilizados comercialmente, que requiere que la corriente de GLP empleada contenga un porcentaje mayor de livianos. El proceso consiste en dulcificar la mezcla y separar los componentes como anhídrido carbónico o mercaptanos, seguidamente se separan los livianos mediante el proceso de destilación y finalmente se llega al paso de separar el Propileno del Propano en el proceso de reflujo por condensación eliminándose los residuos, obteniendo así el propileno listo para la polimerización.

En el proceso de Novolen los reactores son alimentados por el propileno, el etileno y/o algunos de los demás comonómeros y en el mismo se añade hidrógeno que permite llevar un control el peso molecular presente en la reacción, luego se escoge las condiciones en las cuáles se produce la polimerización, tales como presión, temperatura, presión y por último la concentración de los reactivos. Se tiene que la reacción es carácter exotérmico, por lo que se lleva a cabo un enfriamiento del reactor al transferirse el calor en el proceso de descompresión en la mezcla de la línea de alimentación en el reactor con los gases licuados.

#### **2.1.5.1. Proceso de Spheripol**

Es el proceso utilizado en este trabajo, en la figura 4 se muestra el diagrama de flujo, los reactores tubulares donde se genera la polimerización son alimentados permanentemente con: catalizador, propileno líquido e hidrógeno; con estos componentes se produce la homopolimerización y una copolimerización en los reactores con una temperatura de 70°C y manteniendo la presión en 4 MPa.

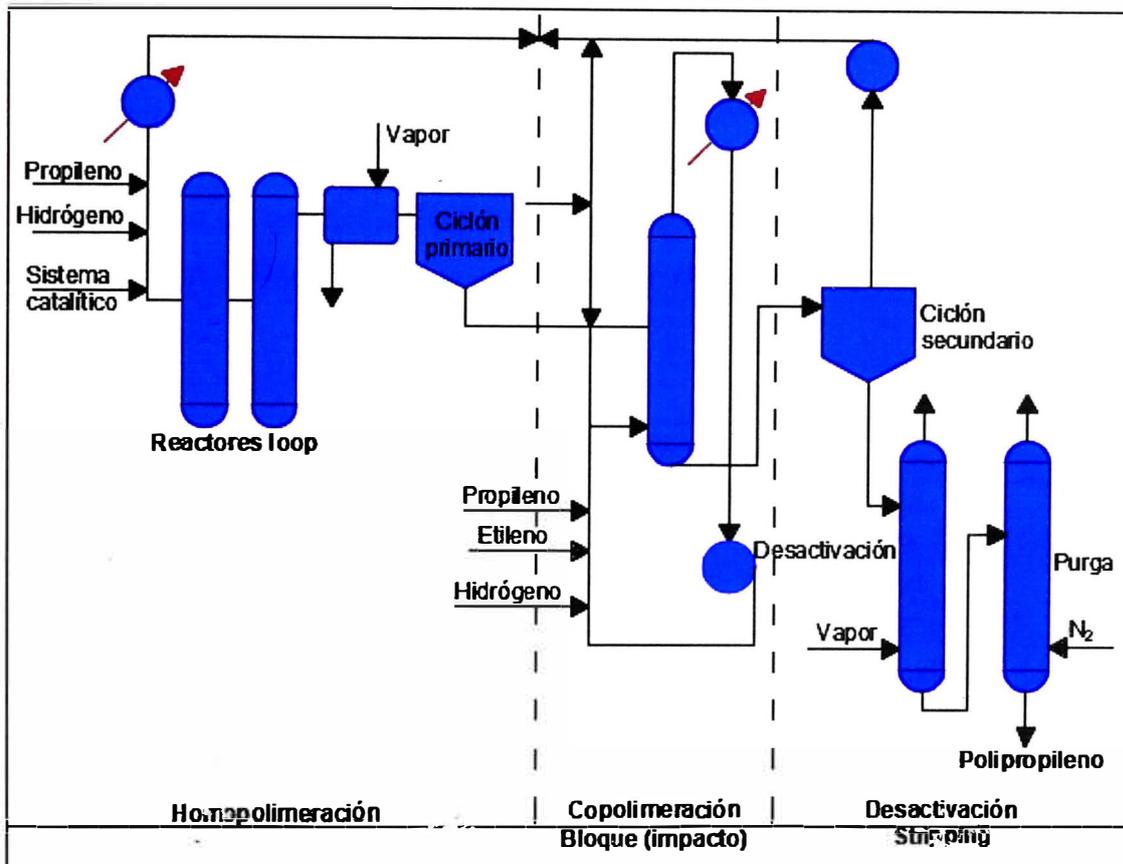


Figura 4. Diagramas de Flujo Proceso de Spheripol

Como se observa es un proceso modular que cuenta con 3 etapas, en él la alimentación del propileno en fase líquida es continua, el hidrógeno es utilizado para controlar el peso molecular, el catalizador es de tercera generación activo y de alta selectividad.

En este proceso se puede utilizar varios catalizadores obteniéndose diferentes propiedades, en la fase gaseosa se utilizó etileno en la fabricación de copolímeros, se puede utilizar otro monómero como el butileno.

#### 2.1.6. Propiedades físico-mecánicas del polipropileno

En cuanto a las propiedades físicas del polipropileno, debe entenderse que son aquellas características que se manifiestan sin alterar su composición química. Estas pueden ser

detectadas o medidas experimentalmente sin producirse reacciones químicas ni cambios en la estructura molecular del polipropileno. (Gamez, 2017).

En la tabla 1, podemos encontrar algunas propiedades físicas que son objetos de estudio en este trabajo, como absorción de agua con un valor de 0.03%, por ende, no presenta mucha humedad porque el coeficiente de absorción de humedad es muy bajo y la densidad con un valor de  $0.9 \text{ g/cm}^3$ , dando la ventaja por ser liviano en comparación a otros polímeros.

**Tabla 1**  
*Propiedades físicas del polipropileno*

<b>Propiedades físicas</b>	
Absorción de Agua – Equilibrio (%)	0.03
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	0.9
Índice Refractivo	1.49
Índice de Oxígeno Limite (%)	18
Inflamabilidad	Combustible
Resistencia a los Ultra-Violetas	Aceptable

*Nota.* Tomado de Gámez, 2017.

La absorción del agua y contenido de humedad es importante que sean valores muy bajos, para poder garantizar que no se produzcan problemas en los procesos como extrusión, moldeo, etc, para que las superficies sean uniformes.

Por otra parte, las propiedades mecánicas del propileno se refieren a aquellas propiedades que se denotan al ejercer presión sobre el mismo. Las propiedades mecánicas del material es la capacidad que tienen para soportar la acción de cargas, las cuales pueden actuar en rangos corto de tiempo y en forma de choque. (Gamez, 2017)

En este trabajo de titulación, mediremos algunas variables descritas en la Tabla 2, determinaremos la dureza (Shore), para verificar la rigidez del material con la incorporación del uso del copolímero, la resistencia a la tracción (MPa) para verificar si incrementa la tensión que pueda soportar el material con el uso del copolímero y así mismo mediremos la resistencia al impacto (J), a diferentes condiciones de temperatura, para determinar la fuerza de unión física entre el polipropileno y el copolímero.

**Tabla 2***Propiedades mecánicas del polipropileno*

<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Alargamiento a la Rotura (%)	150 – 300 para bopp > 50
Coefficiente de Fricción	0.1 – 0.3
Dureza – Rockwell	R80 – 100
Módulo de tracción (GPa)	0.9 – 1.5 para bopp 2.2 – 4.2
Resistencia a la Abrasión ASTM D1044	13 – 16
Resistencia a la Tracción (Mpa)	25-40 para bopp 130-300
Resistencia al impacto Izod (J m-1)	20-100

*Nota.* Tomado de Gámez, 2017.**2.1.7. Resistencia al impacto**

Puede ser descrita como la facultad que posee un material en absorber un impacto y su energía sin sufrir fractura o rotura (Todo en Polimeros, 2016). La resistencia al impacto se puede obtener a partir de la relación que hay en la absorción del golpe y la sección transversal de la probeta.

El impacto por caída de dardo, radica en un equipo que posee un dardo de dimensión y peso variable que se deja caer de diferentes alturas hasta encontrar el punto de fractura o rotura de la probeta, este está constituido por un cuadro plano que brinda soporte de los bordes, de manera que el impacto sea recibido en el centro (Todo en Polimeros, 2016).

Este ensayo se realiza para medir la reacción que tiene la probeta ante impacto multiaxial de un material, a su vez se mide la energía que se necesita para que el material sea perforado o fracturado por el impacto, el cual se muestra como un dardo que cae bajo condiciones de ensayo especificadas. En el presente trabajo, utilizamos como referencia la norma ASTM D5420-04. Este método de prueba cubre la determinación de la relativa, clasificación de materiales de acuerdo con la energía requerida para agrietarse, o romper muestras planas de plástico rígido bajo diversas condiciones específicas de impacto de un percutor impactado por un peso que cae. (ASTM International, 2004, pág. 1)

**2.1.8. Dureza**

Es el aguante mecánico que posee un material al oponerse a una penetración mecánica de un objeto más sólido. La definición de dureza es muy diferente a la de fuerza, pues esta

representa la resistencia de un material a la deformación (Todo en Polimeros, 2016). Se puede describir la dureza como una medida de las propiedades de fricción de un material.

En el caso de polímeros termoplásticos, son utilizadas dos metodologías de ensayos diferentes, además también se determina la dureza Shore. En el presente trabajo, utilizamos como referencia la norma ASTM D 2240 – 05. Este método de prueba cubre dos procedimientos para probar la dureza de indentación de elastómeros termoplásticos o otros tipos de plásticos (ASTM International, 2005, pág. 1).

#### **2.1.9. Módulo de tracción**

En el diseño de piezas de plástico, es de gran importancia las propiedades de tracción que presentes en el material, ya que este permite la predicción del rendimiento del material expuesto bajo tensión, esto de manera general cuando son utilizadas en estructuras de construcciones. Un ensayo de tracción es una prueba mecánica donde la muestra se prepara cuidadosamente para aplicar una fuerza que mide la carga aplicada y la flexión en distancia que logra el material (Mexpolimeros, 2021).

La manera más óptima de observar la resistencia de un material, es mediante las propiedades de tracción que contiene el mismo. La fuerza que se emplea para estirar el material muestra el alargamiento de rotura que tiene el plástico, este módulo de elasticidad es la división ente el esfuerzo y la deformación del límite de material. (Mexpolimeros, 2021)

En el ensayo de tracción, se establecen las propiedades mecánicas presentes en el material de moldeo, estos valores son utilizados por carácter comparativo (Zwick Roell, 2021).

#### **2.1.10. Otras propiedades de los polímeros**

##### **Índice de fluidez**

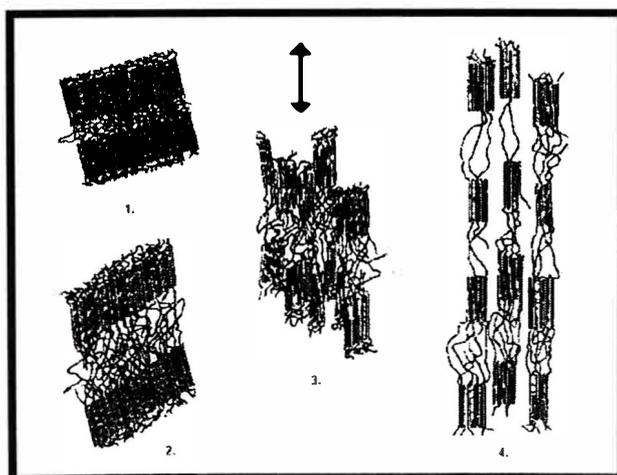
También conocido como MFI, es la medida que tiene el flujo de polímero en fluir (Todo en Polimeros, 2016), la definición de esta viene dada como la masa del producto en unidad de gramos que fluye a través de un orificio capilar durante 10 minutos, con dimensiones de Diámetro y longitud definidos, así como presión y temperatura.

Este se puede utilizar para el cálculo de medida de degradación de un plástico, dado que el polímero tiene la característica de romper sus cadenas moleculares a medida que se va degradando, pues permite que tengan una mejor facilidad de fluir debido que son cadenas

más cortas en comparación a la original. En el presente trabajo, utilizamos como referencia la norma ASTM D1238 – 13 mediante un método de prueba estándar constituida para tasas definidas de flujo de fusión de los termoplásticos con el uso del plastómetro de extrusión” (ASTM International, 2013, pág. 1).

### 2.1.11. Tipos de fallas que puede sufrir el polipropileno

El polipropileno se puede encontrar de acuerdo a sus características de síntesis como sistemas monofásicos, en donde el mecanismo que presenta ante la deformación tiene parámetros comunes, como es el caso del “shear yielding” y el “crazing”. Por su parte, es entendido que, para la geometría de sistemas de dos o más fases, tiene presente un mecanismo definido como refuerzo que puede provenir de una deformación anterior en por partícula elastomérica, crazing múltiple, así como de la acción de una fluencia por cizalla múltiple, cavitaciones o una serie de combinaciones de fallas mencionadas. En la Figura 5 observaremos cada una de las etapas de fallas del polipropileno desde el estado no deformado hasta después de la tensión aplicada.



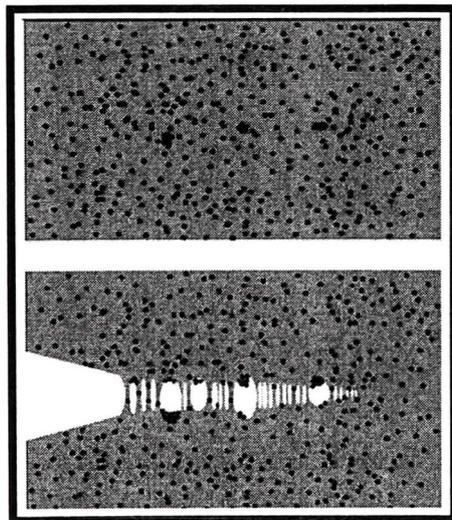
**Figura 5.** *Fallas del polipropileno*

*Nota.* Tomado de Araoz (2018).

La etapa 1 representa el estado no deformado; la etapa 2 corresponde a la extensión que son sometidas las moléculas presentes entre la unión en conjunto con el movimiento de las cadenas internas de las lamelas; la etapa 3 ilustra la fragmentación de las lamelas; y, finalmente, en la etapa 4 se observa una alineación correspondiente en la orientación de la tensión aplicada.

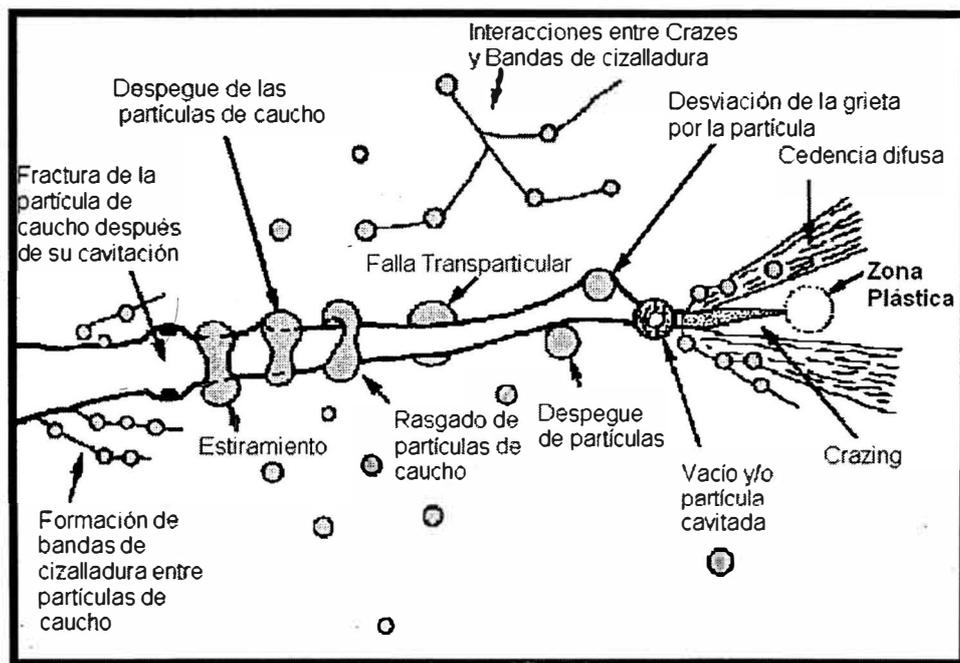
## Crazing

En los termoplásticos es común observar esta variedad de deformación plástica localizada, este, llamado “craze” se genera iniciando en una superficie libre que aparece del resultado de un ablandamiento dado por deformación de este. Esta deformación avanza en sentido el esfuerzo principal mayor. Es fácil comparar las microfisuras y los “crazes” debido a su forma física, sin embargo, se entiende como microfisura a la que es una interrupción presente en material, a cambio del “craze” que representa dos superficies interconectadas principalmente el uso de red de fibrillas de polímero, de entre 5 y 30 nm de espesor, permitiendo que el material aguante la carga. Es así que la generación de las imperfecciones asociadas (Caicedo et al., 2017), en la Figura 6 podemos observar el ablandamiento dado por la deformación y comparar como se aprecia en la figura 7 el comportamiento en la zona plástica y dúctil.



**Figura 6.** *Crazing del polipropileno*

*Nota. Tomado de Caicedo et al., 2017.*



**Figura 7. Zona plástica y dúctil**

*Nota. Tomado de Rosado y Elena, 2018.*

### 2.1.12. Copolímero de polipropileno-etileno

El copolímero de etileno-propileno es un elastómero termoplástico que puede polimerizarse con un catalizador de metalloceno. Los copolímeros de etileno-propileno se caracterizan por una excelente resistencia térmica, así como eléctrica y química. Conjuntamente, en el área de investigación es posible conocer la versatilidad de la metodología procesada con un gran número de aditivos para convertirlos en productos para piezas de motores de automóviles, cables y productos de construcción. Las principales aplicaciones del EPM son las piezas de automoción y los modificadores de impacto de polipropileno (PP). El EPDM puede utilizarse en juntas flexibles de automoción, aislamiento de cables, frentes de neumáticos, mangueras y revestimiento de techos, entre otros. (Todoenpolímeros.com, 2017).

El polipropileno homopolímero isotáctico, iPP, es generalmente conocido por presentar una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) a  $0^\circ\text{C}$  y esto hace que su resistencia a la fractura frente a situaciones de impacto o temperaturas muy bajas sea muy limitada. En efecto, para obtener un aumento de la resistencia, se puede dispersar una fase gomosa en la matriz de polipropileno, de forma que se puedan introducir métodos de deformación en la ruptura con

mayor absorción de energía. En la fase dispersa se realiza con otros polímeros en una mezcla física o mediante poli olefinas de  $T_g$  menores en la copolimerización con el polietileno. Se recomienda la utilización de la mezcla física por su baja mojabilidad (Martin 2010). Se presenta, los tipos de mezclas existentes.

#### **2.1.12.1. Copolímeros randómicos**

Estos se generan al introducir una combinación de etileno y propileno en conjunto en un reactor, en donde se obtienen una serie de cadenas compuestas de propileno con “desperfectos” de etilénicos, los cuales se distribuyen aleatoriamente en la cadena, en los copolímeros randómicos la cristalización no se produce a medida que las secuencias de fallas son largas. Este tipo de reacción proporciona al material, una mejoría de las propiedades del material, siendo este de una transparencia mejor marcada y clara, además de poseer una densidad más baja que el producto original. Al agregarse del etileno en cantidades inferiores al 5% la modificación de las propiedades solo se aprecia de acuerdo a acción de cristalizarse, en cambio al agregar proporciones superiores a 10% las propiedades físicas se ven alteradas como tener un punto de fusión más bajo, mejor rigidez y estabilidad térmica, así como la resistencia al impacto y deformación a rotura (Martín, 2010).

#### **2.1.12.2. Copolímeros en bloque**

Los copolímeros en bloques son obtenidos a partir de la polimerización del propileno mediante el empleo de dos reactores en serie donde el primer reactor ejecuta la reacción de polimerización para posteriormente en otro reactor agregar etileno para producir una polimerización sobre el PP que se ha generado, de manera que se consiguen el desarrollo de cadenas con bloques homogéneos de PP y PE. Estos tipos de plásticos son materiales heterofásicos producidos a partir de una matriz de polipropileno en combinación con partículas discretas de una fase etilénica, arrojando así una conducta similar a la presente en las cadenas de homopolímero, de acuerdo a lo referente la cristalización se presenta en el sistema de manera separada de cada uno de los bloques (Martín, 2010).

En este trabajo de investigación, se hará uso del PPR polipropileno copolímero randómico. Se trabajará con polipropileno (PP) con Índice de fluidez de 2.1 g/10min y del copolímero en 1.5 g/10min.

La estructura de carbono del polipropileno (ver Figura 8) posee una composición química distinta, esta está constituida por secciones de polipropileno combinada con moléculas de etileno, un comonómero que se posiciona de manera aleatoria a través de toda la cadena.

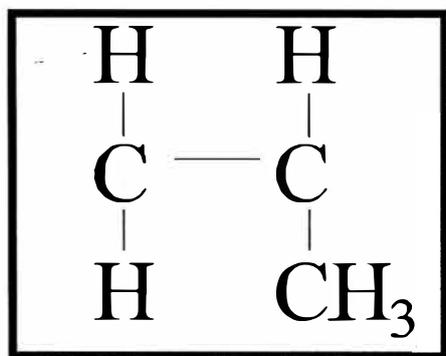


Figura 8. Estructura de polipropileno

El copolímero de polipropileno posee una estructura más suave con respecto al polipropileno (ver Figura 9), sin embargo, esta combinación de termoplásticos le permite tener una resistencia al impacto más adecuada, además de tener una durabilidad superior al del homopolímero de polipropileno. “adquiere una tendencia a mejorar la resistencia a los cambios externos, disminuyendo el agrietamiento ocasionado por esfuerzo, del mismo modo ante la temperatura es poco fuerte en comparación al homopolímero” (Chemieuro, 2021).

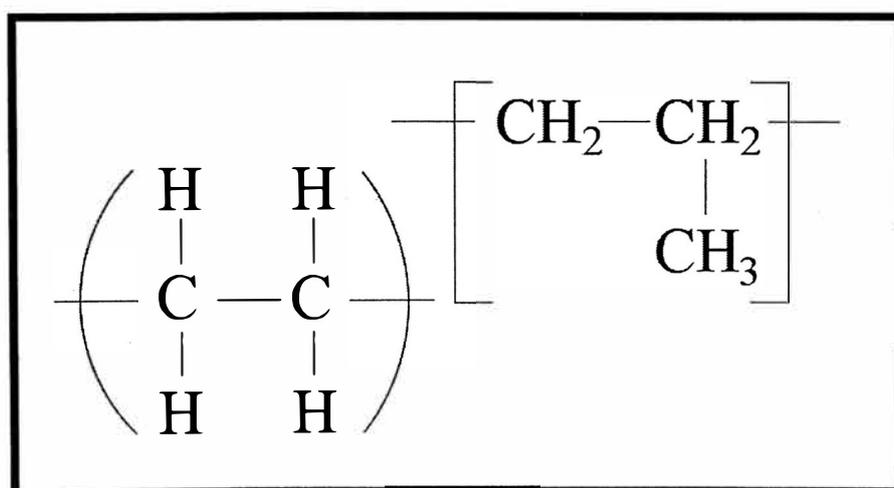


Figura 9. Copolímero Random  
(propileno-etileno)

Entre las ventajas que posee el copolímero de polipropileno es su buena resistencia química en ambientes corrosivos, a solventes orgánicos, agentes desengrasantes y a ataques

electrolíticos (ligera resistencia a las manchas), además de una baja tasa de absorción de humedad.

### **2.1.13. Uso de Carbonato de Calcio**

El uso del carbonato de calcio dentro de la industria de los plásticos, es muy demandante, pues el mismo es aplicado de manera frecuente como extendedor, pigmento o carga, es empleado en una variedad de polímeros que van desde PVC, polietileno hasta polipropileno resina epóxica, entre otros. (Todo en Polimeros, 2019)

El empleo de este material va de la forma de sólido molido purificado, es utilizado para dar volumen en la estructura de los plásticos, para su uso este pasa por un proceso de purificación a través de la remoción de hierro y sílice, esto con la finalidad de reducir la degradación del material plástico, una vez realizada la purificación, este es molido y agregado en los plásticos cargados elevando las propiedades físicas del material y reduciendo el costo de inversión.

Cuando se emplea este mineral en combinación de un vehículo, que comúnmente es una resina compatible con la formulación, se tiene las siguientes ventajas: menor abrasión, alta dosificación (entre 20% y 30%), y dispersión uniforme.

## **2.2. Marco Legal**

El Reglamento Nacional de Edificaciones aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en el Perú, no restringe el tipo del material a utilizar para techos, sólo se debe garantizar el uso, “Carga viva, para techos de coberturas livianas de planchas onduladas o plegadas, calaminas, fibrocemento, material plástico, etc., cualquiera sea su pendiente 0.30 KPa (30Kgf/m<sup>2</sup>), excepto cuando en el techo pueda ver acumulación de nieve” (Decreto Supremo N°011, 2006, pág. art7).

## CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

En esta sección se describe la metodología experimental utilizada, así como los métodos, técnicas y procedimientos aplicados en el progreso del trabajo de tesis presente.

### 3.1. Naturaleza de la investigación

Dentro de las características que describen el presente trabajo de titulación profesional, se encuentra con una posición de investigación cuantitativa, que tiene como finalidad comprobar su hipótesis con base a mediciones numéricas, el tipo de diseño es de naturaleza experimental, debido a que para la obtención de un resultados se tiene la manipulación del objeto (Vásquez, 2020) .

### 3.2. Materiales

El presente trabajo de titulación profesional ha empleado un polipropileno isotáctico homopolímero (iPP) de índice de fluidez 2,1 g/10min y densidad 0.901 g/cm<sup>3</sup> de la empresa Petroquim indicados para procesos de extrusión, soplado y termoformado y un copolímero random de polipropileno-etileno de índice de fluidez 1.5 g/10min y densidad 0.901 g/cm<sup>3</sup> de la empresa Esenttia con alto contenido de etileno indicados para proceso de extrusión, soplado, coextrusión, termoformado; cómo podemos ver en la Figura 10 y Figura 11, tanto el polipropileno como el copolímero tienen una geometría similar.

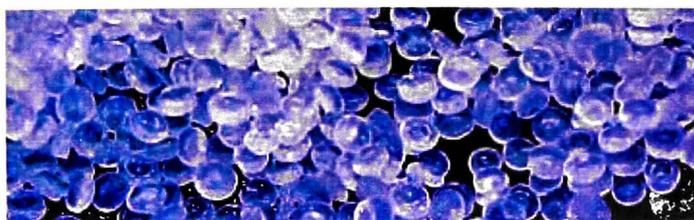
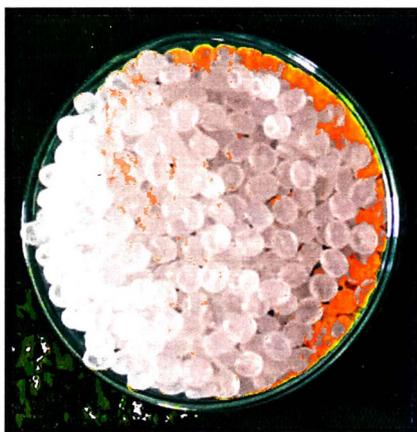


Figura 10. Polipropileno



**Figura 11.** Copolímero random de polipropileno-etileno

Se utilizó polipropileno con diferentes porcentajes de adición 5%, 10% y 15% denominados (PP-CP5, PP-CP10, PP-CP15), según lo indicado en la Tabla 3.

Tanto el iPP en adelante, PP-CP0 (FORM A) y los copolímeros en adelante, PP-CP5 (FORM B), PP-CP10 (FORM C), PP-CP15 (FORM D) fueron seleccionados con un índice de fluidez que le permita ser transformados en el proceso de extrusión.

**Tabla 3**  
*Formulaciones de Polipropileno Copolímero*

DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES	INICIO		FINAL	
	Fórmula 0 0% Copolímero	Fórmula 1 5% Copolímero	Fórmula 2 10% Copolímero	Fórmula 3 15% Copolímero
Polipropileno	96,0%	91,0%	86,0%	81,0%
Aditivo UV	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Carbonato de Calcio Peletizado	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Copolímero Randómico	0,0%	5,0%	10,0%	15,0%

Nota: Elaboración propia

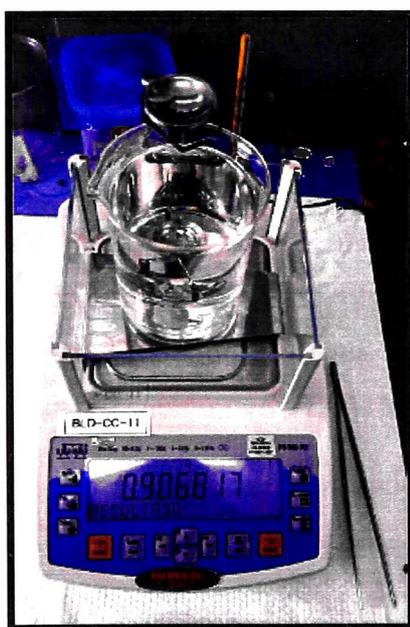
### 3.2.1. Ensayos físicos

Los ensayos físicos serán realizados a la materia prima en estudio, en este caso será aplicado para el polipropileno y el copolímero.

### 3.2.1.1. Ensayo de densidad

Para el cálculo de densidad, trabajaremos en referencia a la norma “ASTM D792-13 Métodos de prueba estándar para densidad y gravedad específica (densidad relativa) de plásticos por desplazamiento (ASTM International, 2014, pág. 1). Según la norma tal se procede de la siguiente forma: se determina la masa de una muestra de plástico sólido en el aire, luego se sumerge en un líquido, se determina su masa aparente tras la inmersión y se calcula su gravedad específica (ASTM International, 2014, pág. 1).

Para ello utilizaremos una balanza electrónica de la marca Radwag con precisión 0,1 mg, a una temperatura de 23°C, utilizando como líquido de inmersión será bencina con densidad 0.72 g/cm<sup>3</sup>, como se puede observar en la Figura 12, para determinar la densidad aparente de materiales sólidos como el polipropileno y del copolímero.



*Figura 12. Determinación de la densidad de materiales sólidos*

Como podemos observar en la Tabla 4, los valores tanto del polipropileno y del copolímero son muy comparables, obteniéndose como densidad promedio 0.901 g/cm<sup>3</sup>, esto permite que gracias a su baja densidad cualquier producto derivado del mismo, sea ligero.

**Tabla 4**  
*Determinación de la densidad*

MATERIAL PROVEEDOR	DENSIDAD g/cm <sup>3</sup>	
	COPOLÍMERO ESENTIA	POLIPROPILENO PETROQUIM
1	0,902	0,901
2	0,902	0,901
3	0,902	0,900
4	0,901	0,900
5	0,902	0,900
6	0,902	0,901
7	0,902	0,902
8	0,900	0,900
9	0,901	0,901
10	0,901	0,901
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,902</b>	<b>0,901</b>

Este método de prueba determina la densidad relativa, medido a partir del desplazamiento del líquido al sumergir el sólido.

### 3.2.1.2. Ensayo de absorción de humedad

El analizador de humedad nos sirve para indicar el contenido de masa seca de una muestra, precisa el contenido de agua, utilizaremos como referencia la norma “ASTM D570 - 98 Método de prueba estándar para absorción de agua en plásticos, realizaremos este procedimiento para el polipropileno y copolímero”. (ASTM International, 1998, pág. 1)

La balanza electrónica de contenido de humedad (analizador), de marca Radwag tiene una precisión de un 0,1 mg, el ensayo se realiza a condiciones de temperatura de ambiente  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Al inicio del procedimiento, el analizador define el peso inicial del material (aproximadamente 5 gramos), como se muestra en la Figura 13, luego se realiza la inmersión de la muestra en agua en un vaso de precipitado, el diámetro aproximadamente del gránulo es de 4,6 mm (Ver Figura 14), la repetitividad del ensayo será de 05 veces. Al llevar la muestra al analizador, luego de las 24 horas, este facilita el proceso de secado, convierte los datos proporcionados en resultados de contenido de humedad , tal como se muestra en la Tabla 5.



Figura 13. Analizador de contenido de humedad



Figura 14. Diámetro de gránulos

Tabla 5  
Determinación de la absorción de humedad

MATERIAL PROVEEDOR	Contenido de humedad %	
	COPOLÍMERO ESENTIA	POLIPROPILENO PETROQUIM
1	0,035	0,038
2	0,037	0,039
3	0,037	0,037
4	0,038	0,037
5	0,036	0,038
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,037</b>	<b>0,038</b>

*Nota.* En el gráfico observamos que el valor de contenido de humedad del polipropileno y del copolímero son similares, arrojando valores similares al de la Tabla 1, propiedades físicas del polipropileno.

Como podemos observar el valor del contenido es bajo en ambos materiales, 0.037 % en promedio, con ellos podemos garantizar la calidad del producto y proceso.

### 3.2.2. Ensayo reológico índice de fluidez

Se analizó el índice de fluidez del polipropileno y copolímero de polipropileno-etileno. Utilizando un plastómetro de extrusión para medir índice de fluidez.

Este método de prueba, cubre la determinación de la velocidad de extrusión de resinas termoplásticas fundidas usando un plastómetro de extrusión, las unidades de medida son gramos del material / 10 minutos (g / 10 min), se basa en la masa del material que sale de matriz, durante un periodo de tiempo, utilizaremos como referencia la norma ASTM D 1238-13, mediante Tasas de flujo de fusión de termoplástico, mediante plastómetro de extrusión (ASTM International, 2013, pág. 1), utilizando el procedimiento A de la norma, para índice de fluidez en el rango de 0.15 a 50 g/10min.

Se utiliza aproximadamente 5 gramos de muestra del material a evaluar. Para el caso del polipropileno y el copolímero, tenemos la “Tabla 6”, en la cual nos sugieren la temperatura de 230 °C para fundir el material y una carga de 2,16 Kg.

**Tabla 6**  
*Condiciones de pruebas seguras para materiales seleccionados*

<b>Material</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
Polipropileno	230	2,16

Nota: Elaboración propia

El equipo utilizado en laboratorio, para medir el índice de fluidez es el plastómetro, XNR-400 (Figura 15), el cual opera con una presión constante, ejercida por una fuerza constante, debido a un peso conocido en este caso 2,16 Kg, por un tubo capilar de área no variable.



Figura 15. Plastómetro de extrusión

Nota: Elaboración propia

Para el cálculo del índice de fluidez másico (MFI), tenemos 03 variables, el tiempo de referencia ( $t_{ref}$ ) que son los 10 minutos (600 segundos); el intervalo de corte ( $t$ ), es de 20 segundos y el peso promedio en gramos de las muestras cortadas ( $m_{prom}$ ), utilizamos la siguiente fórmula.

$$MFI (230^{\circ}C; 2,16 Kg) = \frac{t_{ref} \times m_{prom}}{t}$$

Para obtener un valor promedio del MFI, tanto del polipropileno y copolímero, realizamos un promedio de 10 ensayos por cada material, mostrados en la Tabla 7, obteniendo un valor promedio de para el PP de 2,1 g/10 min y del copolímero de 1,5 g/10 min.

**Tabla 7**  
*Índice de fluidez de materia prima*

<b>INDICE DE FLUIDEZ g/10 min</b>		
<b>MATERIAL</b>	<b>COPOLÍMERO</b>	<b>POLIPROPILENO</b>
<b>PROVEEDOR</b>	<b>ESENTIA</b>	<b>PETROQUIM</b>
<b>1</b>	1,3	2,2
<b>2</b>	1,4	2,0
<b>3</b>	1,6	2,1
<b>4</b>	1,4	2,0
<b>5</b>	1,5	2,0
<b>6</b>	1,4	2,0
<b>7</b>	1,6	2,0
<b>8</b>	1,6	2,1
<b>9</b>	1,4	2,1
<b>10</b>	1,5	2,1
<b>PROMEDIO</b>	<b>1,5</b>	<b>2,1</b>

El índice de fluidez nos permite indirectamente poder controlar el peso molecular, con ello podemos controlar la procesabilidad del material.

### **3.3. Parte Experimental**

En esta sesión se encuentra expresada y detallada la metodología a utilizar en el desarrollo experimental del trabajo de investigación presente, mostrando el tratamiento de elaboración de las muestras de polipropileno con la adición del copolímero de polipropileno-etileno, desde el mezclado, al laminado, acondicionamiento, molido y prensado.

La investigación fue segmentada en tres etapas, mediante las cuales se podrá obtener los resultados de forma secuencial y esquemática. A continuación, se listan con sus respectivas actividades a ejecutar durante cada una de éstas.

#### **3.3.1. Obtención y preparación de las muestras**

Para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánica en láminas de polipropileno con espesor de 1 mm, con adición de copolímero random en diferentes dosificaciones para proceso de extrusión, se fabricarán las piezas o muestras para las evaluaciones

correspondientes, mediante la metodología aplicada en un extrusor piloto con diseños establecidos.

#### a) Mezclado

Se realiza el fundido de las materias primas en una mezcladora de termoplástico Brabender o Reómetro de torque (Ver Figura 16), la cual permitirá una producción no continua de mezclas homogéneas a escala de laboratorio, para ello se utiliza un torque de 32 rpm. La utilización de un Reómetro de torque permite obtener datos valiosos con respecto a la capacidad de procesamiento de los polímeros micro y nano materiales, por ser un equipo de mezclado que basa su medición en medida del esfuerzo de torsión reflejado por el material con respecto a las cuchillas giratorias durante el proceso.



**Figura 16.** *Equipo Brabender o reómetro de torque*

Nota: equipo utilizado en el laboratorio.

#### b) Laminado

Luego de haber sido mezclada la materia prima, polipropileno con la adición del copolímero de polipropileno-etileno, se obtiene una masa fundida la cual se hace pasar por rodillos con la finalidad de simular el proceso de calandrado en una extrusora (Ver Figura 17), con la finalidad de moldear filmes o láminas con el aspecto superficial deseado.



**Figura 17. Laminado de mezclas**  
Nota: Rodillos del laboratorio

### c) Acondicionamiento del material

Una vez obtenidas las láminas, estas son cortadas en secciones más pequeñas (Ver Figura 18), para disminuir el tamaño y poder realizar un molido uniforme dentro del equipo.



**Figura 18. Recorte de láminas**

### d) Molienda

Una vez acondicionado el material en finas láminas, estas son ingresadas a un molino (Ver Figura 19), con la finalidad de obtener mejor mezcla más homogénea y manejable para el prensado, que permitirá la ejecución de los análisis necesarios.



**Figura 19.** *Equipo de molino*  
Nota: Equipo presente en el laboratorio

Este procedimiento se realizará para cada una de las formulaciones (ver Figura 20), dando un nombre como FORM A para la adición de 0% de copolímero, FORM B para la adición de 5% de copolímero, de la misma manera para el 10% y 15% de copolímero. El material cortado ingresa al molino para obtener una mejor mezcla homogénea en la siguiente fase de prensado.



**Figura 20.** *Muestras de molienda de polipropileno con adición de copolímero*

### e) Prensado

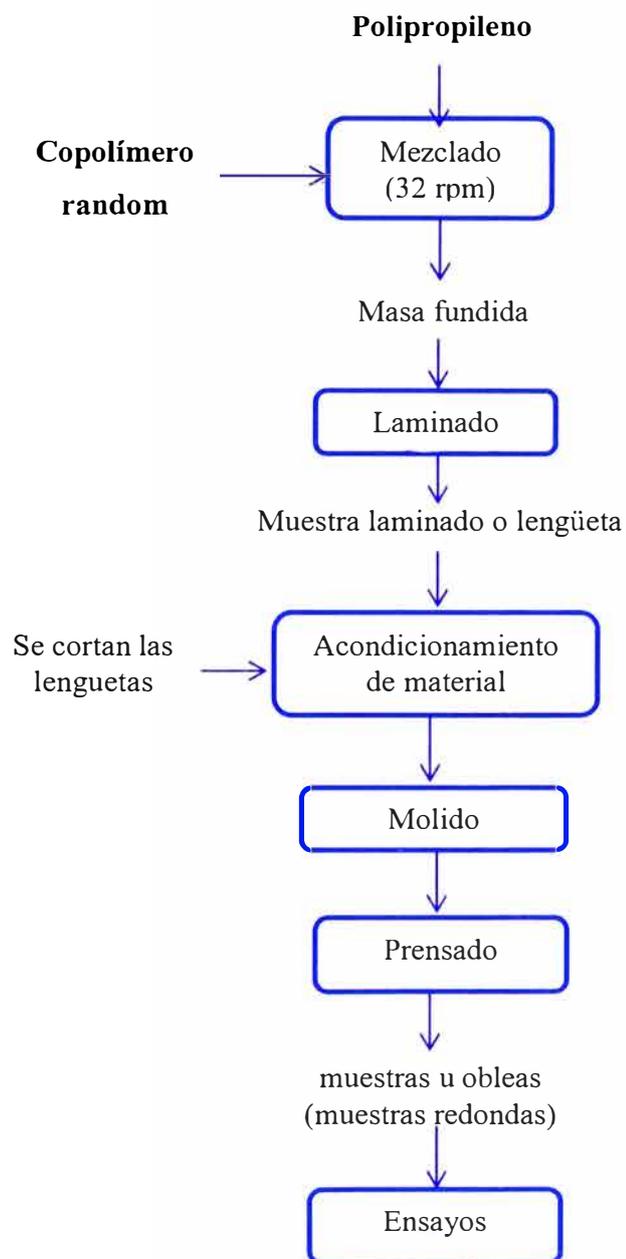
Posterior al molido de las muestras, estas serán llevadas al equipo carver de prensado (Ver Figura 21), donde se realizará el modelado final de las muestras a analizar, con sus diferentes concentraciones de aditivo, el material molido se coloca a 250°C, con una duración de 1 min y medio. Hasta obtener las muestras u obleas (muestras redondas), para la ejecución de diferentes ensayos.



**Figura 21.** *Equipo carver de prensado*

Nota: Equipo presente en el laboratorio

Para realizar los ensayos, se tienen diferentes procesos para la obtención de la muestra cómo podemos ver en la Figura 21.



**Figura 22.** “Diagrama de obtención de muestras”

### 3.3.2. Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos realizados como tracción, dureza y resistencia al impacto se realizarán adicionando 5%, 10% y 15% de copolímeros para ser evaluados posteriormente.

### 3.3.2.1 Ensayo de tracción

La probeta normalizada se somete a una fuerza axial de tracción creciente hasta el punto de rotura, para medir la resistencia del material, se utilizó como referencia, la norma ASTM D 638-03, mediante método de prueba estándar para la tracción, propiedades de los plásticos (ASTM International, 2003, pág. 1). La unidad de medida de la resistencia a la tracción es el Mega Pascal (MPa) o en  $N/mm^2$ .

Las condiciones de ensayo, fueron realizadas a temperatura de ambiente  $23 \pm 2^\circ C$  y humedad relativa  $50 \pm 5\%$ . Este ensayo se puede aplicar para materiales de hasta 14 mm de espesor, en nuestro caso es de 1 mm.

El equipo de ensayo universal, cuenta con un software, en el cual se introduce los valores de dimensiones de la probeta, para determinar el área de la sección transversal (A). La probeta es sometida a una carga (W) y colocada entre los extensómetros, a una distancia entre las marcas del calibre (L) y la distancia inicial entre las marcas del calibre ( $L_0$ ), al ser sometidas a la carga se observa un incremento de la distancia entre las marcas de calibre  $\Delta L$ , conocido como alargamiento. Así mismo, para el determinar la resistencia a la tracción ( $\sigma_T$ ) tenemos el cociente de la carga y el área transversal, cuando se supera la resistencia a la tracción se produce la rotura del material en el caso de la resistencia a la tracción en el punto de rotura ( $\sigma_{UT}$ ), el área transversal será el área de la sección transversal en el punto de rotura ( $A_T$ ).

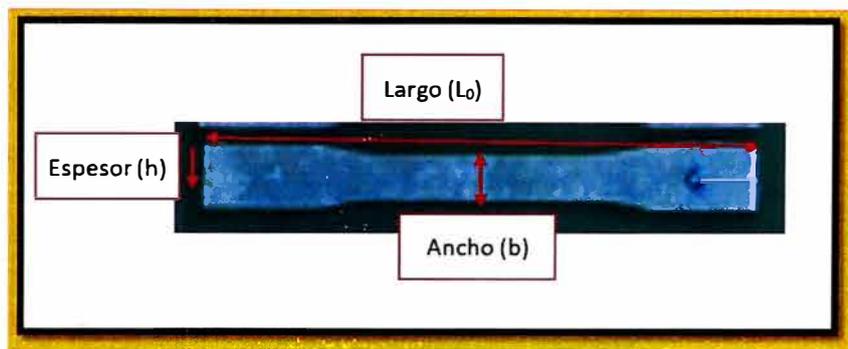
El alargamiento unitario ( $\varepsilon$ ) es el coeficiente determinado en la división de lo que aumento la probeta y la longitud inicia ( $L_0$ ), debido a la fuerza de tensión.

$$\sigma_T = \frac{W}{A} \quad \sigma_{UT} = \frac{W}{A_T} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

A la salida de la laminadora se extraen 10 muestras de cada tipo de formulación, con las cuales se elaboran las probetas que deben cumplir las dimensiones de la Tabla 8 y con la forma según la Figura 23.

**Tabla 8**  
*Dimensiones promedio de las probetas*

<b>Ancho</b>	<b>Largo</b>	<b>Espesor</b>
<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
<b>13.0 – 13.5</b>	165	1.00



**Figura 23.** Dimensiones de probetas

Se observa en los extremos un sobre ancho con una transición al ancho normativo de la probeta, con la finalidad al realizar el ensayo de eliminar las concentraciones de los esfuerzos.

De cada laminada se obtiene 10 muestras, las cuales se dividen en 5 tramos obteniéndose un total de 50 probetas. Según lo indicado en el Procedimiento de muestreo, se tiene tamaño de lote  $m=50$  unidades por lo tanto Nivel de Inspección II, letra D, el tamaño de muestra  $n=8$ , para este ensayo se analizaron 8 probetas, como se observa en el anexo 2 (plan de muestreo normal)

Descripción de las actividades para el ensayo de tracción, las probetas son colocadas entre los extensómetros y se ajusta con la llave corona N°16 (Ver figura 24). El software utilizado en el equipo de ensayo universal es el TestXpert II, donde se colocan los parámetros solicitados como las dimensiones de probetas.



**Figura 24.** Colocación de probeta entre extensómetros

Las probetas son montadas en el equipo de ensayo universal a una temperatura de 23°C, se realiza el ensayo a todas las probetas y son guardadas mediante números correlativos, el programa TestXpert II nos permite adicionalmente guardar la fecha e identificación de la probeta.

El programa nos dará información de la resistencia a la tracción ( $\sigma_T = \sigma_M$ ), mediante la curva esfuerzo vs tiempo de ensayo (Ver Figura 25). La prueba es repetitiva y se ensaya de acuerdo a lo descrito, se guarda el ensayo, con la fecha en que se realiza y el correlativo inmediato, para su posterior análisis.

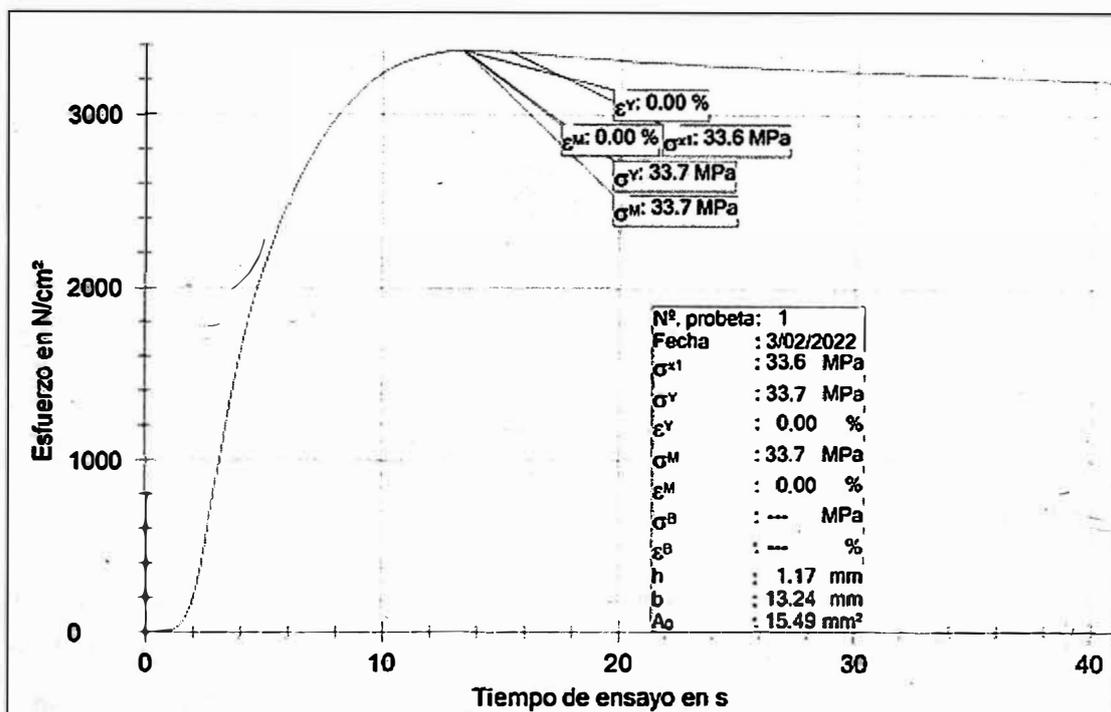


Figura 25. Gráfico esfuerzo vs tiempo del ensayo de tracción

Nota: salida del programa TextXpert II.

### 3.3.2.2 Ensayo de dureza

Se mide la resistencia de un material a ser rayado o penetrado, con un indentador de ciertas características y carga, utilizaremos como referencia a la norma ASTM D 2240-05 mediante método de prueba estándar para propiedades del caucho: dureza del durómetro (ASTM International, 2005, pág. 1). La unidad de medida de la dureza es el shore.

Las condiciones de ensayo, fueron realizadas a temperatura de ambiente  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa  $50 \pm 5\%$ . Se estable la denominación de tipo M, a durómetro destinados a muestras con espesor de 1.25 mm y tienen un rango de dureza entre 20 a 90 shore, utilizando un indentador tipo D, con punta cónica y un ángulo de  $30^\circ$  (ver Figura 26), adecuado para medir material termoplástico.

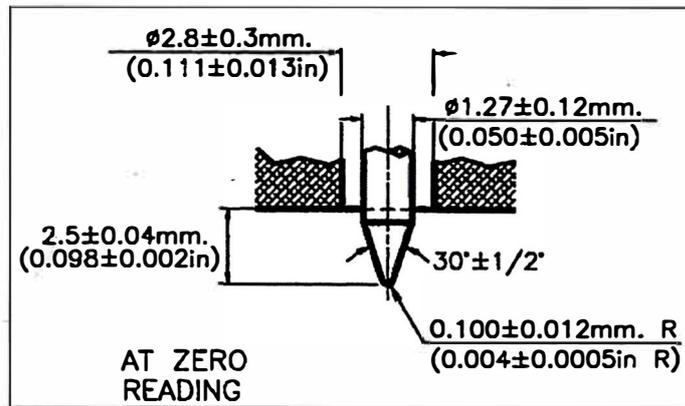


Figura 26. Indentador tipo D

Método de extracción, determina la zona en donde se realiza el ensayo, la muestra u oblea con diámetro de 135 mm, obtenida después del proceso de prensado, es llevada a la geometría indicada (Ver Figura 27), con dimensiones de 125mm x 75mm, para su posterior ensayo de dureza. La cantidad de muestra por formulación es de 10 unidades.

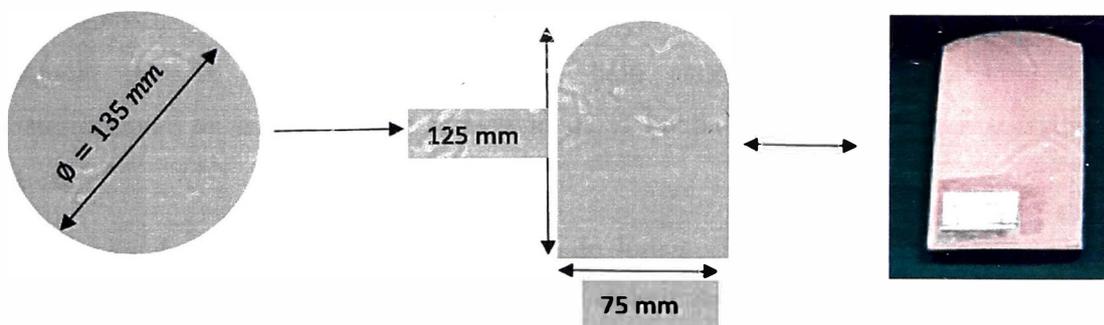


Figura 27. Geometría para ensayo de dureza 125 mm x 75 mm

Equipos e instrumentos utilizados en el ensayo, para la medición de la dureza, se utiliza el durómetro Shore TH210 (ver Figura 28), este es un equipo que posee un dispositivo de medición capacitado con un cabezal y conexión a una pantalla digital que brinda una precisión de 0,2 unidades de dureza en cada una de sus lecturas y una celda de carga de 4,70 Kg.



**Figura 28.** *Durómetro shore TH210*

Para determinar la medida de dureza del material, utilizamos un durómetro, mediante un dispositivo diseñado para medir la propiedad de la dureza, basado en un indentador en contacto con la superficie del material, bajo cargas y velocidades controladas, posteriormente se relaciona la profundidad de la huella con las tablas normalizadas de dureza.

Descripción de las actividades para el ensayo de dureza, fijamos el durómetro y colocamos la muestra a medir sobre la plataforma circular, debajo de la punta penetradora, bajamos la manivela y la punta del durómetro presiona hacia adentro la superficie de la muestra, arrojando el valor de dureza en unidades shore en la pantalla digital del durómetro.

### **3.3.2.3 Ensayo de impacto**

Es una de las propiedades mecánicas más importante de un polímero, es la capacidad de absorber energía sin romperse, se entiende como la resistencia de un plástico a la fractura, por el choque de una carga, las condiciones de temperatura de la prueba es muy importante ya que afecta la tenacidad del material, para medir esta resistencia al impacto utilizaremos como referencia la norma ASTM D5420-04 mediante resistencia al impacto de una muestra de plástico rígida y plana por medio de un percutor impactado por un peso que cae, impacto

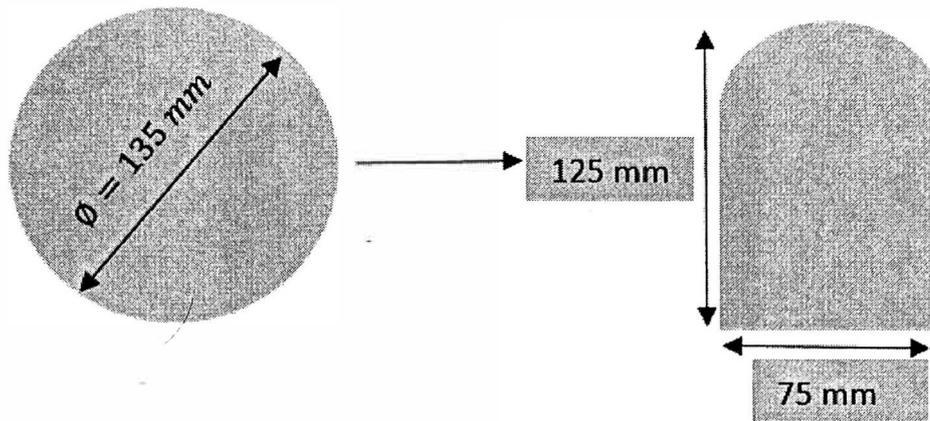
Gardner (ASTM International, 2004, pág. 1). La unidad de medida de la resistencia al impacto es Joule (J).

La degradación del material plástico, es un proceso que modifica la estructura del polímero para hacerle perder propiedades tanto físicas como químicas mediante la acción de factores como exposición a la luz ultravioleta, temperatura, la humedad, trataremos de medir la degradación del material realizando el ensayo de impacto, luego de tener las muestras sometidas a los factores mencionados.

Los ensayos fueron realizados en 03 diferentes condiciones, la primera se realizó a temperatura de ambiente  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa  $50 \pm 5\%$ , la segunda a temperatura  $0 \pm 1^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa  $50 \pm 5\%$  y la tercera luego de someter las muestras a la cámara de envejecimiento acelerado por 900 horas, que será explicado más adelante, para realizar un comparativo entre las formulaciones con adición de copolímero, a temperatura de ambiente  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa  $50 \pm 5\%$ .

La cámara de envejecimiento acelerado o la cámara de degradación (QUV), simula los daños causados por la luz solar utilizando ultravioleta (UV), con fluorescentes especiales en el espectro de radiación de longitud de onda larga (UVA), comprendida entre los 315 nm a 400 nm, así como la lluvia y rocío con humedad condensada, mediante ciclos alternos, reproduciendo los daños que pudiera sufrir el material en un menor tiempo. La luz ultravioleta, es una de las mayores causantes de la degradación del material cuando son expuestos a la intemperie, algunos de estos daños son cambio de color, agrietamiento, fragilidad, pérdida de resistencia siendo este último, materia de análisis.

En la figura 29 mostraremos la geometría para el ensayo de impacto aquella con diámetro de 135 mm y las muestras que ingresaran a la cámara de degradación son las de geometría 125 mm x 75 mm.



**Figura 29.** Geometría para ensayo de impacto

Método de extracción, determina la zona en donde se realiza el ensayo, la muestra u oblea, obtenida después del proceso de prensado con diámetro de 135 mm, son utilizadas para el ensayo a 23°C una cantidad de 10 unidades y a 0°C una cantidad de 15 unidades, finalmente la oblea es llevada a la geometría indicada (ver Figura 29), con dimensiones de 125mm x 75mm, para realizar un comparativo de resistencia al impacto luego de ser sometidas a la cámara de envejecimiento por 900 horas, la cantidad de muestra por formulación es de 5 unidades.

Equipos e instrumentos, para la medición de la resistencia al impacto, se utiliza un equipo de Impacto Gardner de base metálica de 28 cm x 30 cm con soporte y tubo de guía (Ver Figura 30), posee un cilindro guía, que tiene una ranura que sirve de guía para deslizar la masa de impacto, cuenta con una escala graduada de 0 a 1940 mm; masa de impacto, sujeta por un cordel que reposa sobre una polea (0.992 kg, 2.010 kg, 2.985 kg, 3.997 kg) y percutor para la superficie de contacto entre la masa y la muestra a ensayar (Ver figura 31). Así mismos instrumentos como pirómetro o termómetro infrarrojo de rango: -32 °C – 535 °C y micrómetro digital de rango: 0 - 25mm 0.001mm. Para las muestras ensayadas a 0 °C, utilizamos una congeladora de rango de -20 °C a +5 °C.



**Figura 30.** Equipo Gardner para ensayo de impacto

Nota: Equipo disponible en el laboratorio



**Figura 31.** Equipo Gardner

Nota: Equipo disponible en el laboratorio

Para medir la resistencia al impacto luego de someter las probetas al ensayo de degradación, se utiliza la cámara de envejecimiento QUV/basic (ver Figura 32), equipado con 06 lámparas fluorescente UV y un sistema de condensación para la simulación de humedad. La irradiación se ajusta a 1.30 vatios por metros cuadrados ( $W/m^2$ ). En este caso se realizará un comparativo entre las muestras adicionando 0%, 5%, 10% y 15% (ver Figura 33), para verificar el comportamiento entre ellas.



Figura 32. Equipo cámara de envejecimiento QUV



Figura 33. Muestras para evaluar en equipo QUV/Basic

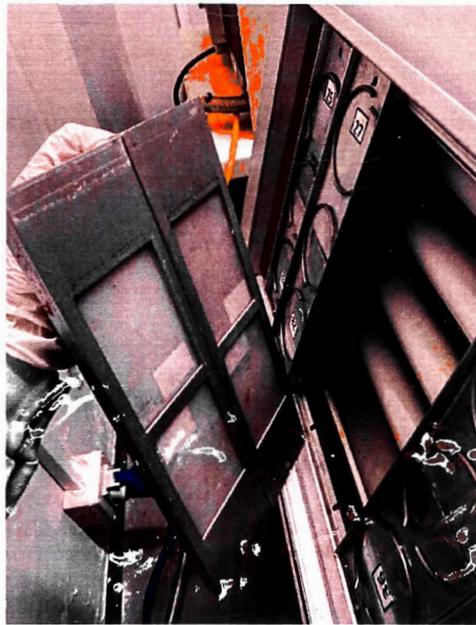
Nota: Elaboración

El equipo de impacto Gardner permite medir la energía, mediante la capacidad del material de absorber una carga en caída libre. La energía ( $E$ ), se determina mediante el producto de la masa de la bala “ $m$ ” expresada en kilogramos, la gravedad “ $g$ ” ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) y la altura de caída “ $h$ ” expresada en metros, para los ensayos realizados a temperatura de ambiente ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$$E = mxgxh$$

Para el caso del ensayo realizado a  $0^\circ\text{C}$ , se necesitará el apoyo de un personal, afin de que nos pueda proporcionar las probetas que se hallan reposando en la congeladora con 24 h de anticipación, con el objetivo de que estas permanezcan a una temperatura menor a  $0^\circ$ , esto debido que transporte de la congeladora al equipo de impacto Gardner ira aumentando temperatura.

Para el caso de hallar la resistencia al impacto, posterior al ensayo en la cámara de envejecimiento, las muestras son colocadas dentro del equipo (ver Figura 34), se exponen por 900 horas, utilizaremos como referencia la norma ASTM G 154. Se tiene ciclos de 300 horas por tanto se exponen las muestras a 3 ciclos. De los cuales el proceso sigue la siguiente estructura 08 horas expuesto a UV, 03:55 horas expuesto a condensación y 05 minutos expuesto a rocío, dando un total de 12 horas.



**Figura 34.** Muestras colocadas dentro del equipo QUV

Se verifica que la masa a utilizar se encuentre en punto muerto o nivel cero, colocamos la muestra a ensayar sobre la base del equipo, para ello levantar el percutor y colocar el espécimen, verificar temperatura inicial registrar, sujetamos con los dedos el cordel que sostiene la masa y jalar con el fin de levantarla hasta la altura desde la cual se dejará caer, soltamos el cordel, para lograr impacto de la masa sobre el percutor y a su vez este traslade el impacto a la muestra en prueba, se deberá evitar el rebote del percutor, esto podría causar un falso dato. Luego tomamos la temperatura final sobre la muestra inmediatamente después de haber sido impactada, verificamos si falla la muestra, de lo contrario continuamos cuantas veces sea necesario para verificar la resistencia del material. Si la muestra absorbe la energía

de impacto y no fractura, se anota la altura de referencia, para su posterior análisis, si presenta fractura, se discrimina la misma.

Para realizar el mismo ensayo a temperatura 0°C, se debe contar con personal de apoyo, afín de que nos pueda proporcionar los especímenes que se hallan reposando en la congeladora con 24 h de anticipación, con el objetivo de que estas permanezcan con una temperatura menor a 0°, esto debido a que el transporte de la congeladora al equipo de impacto Gardner ira aumentando temperatura, repetir las actividades descritas anteriormente

### **3.4. Balance de Materia y Energía**

Para la apreciación de los modelos aplicables en los diseños de equipos y mejoras de los mismos, es común utilizar software de simulación de procesos con la finalidad de adelantarse a los resultados esperados o pronosticar los posibles cambios de acuerdo a las variables aplicadas, uno de los cálculos comúnmente utilizados son balances de materia y de energía, los cuales arrojan valores termodinámicos considerablemente confiables, y permiten obtener entornos de operación reales aplicables a modelos de equipos. La simulación de procesos al utilizar será realizada teóricamente con la finalidad de obtener datos aproximados, sin reacciones químicas.

#### **3.4.1. Diseño de Ingeniería**

Dependiendo de la novedad en el área de ingeniería química, se suele divide en tres tipos los proyectos:

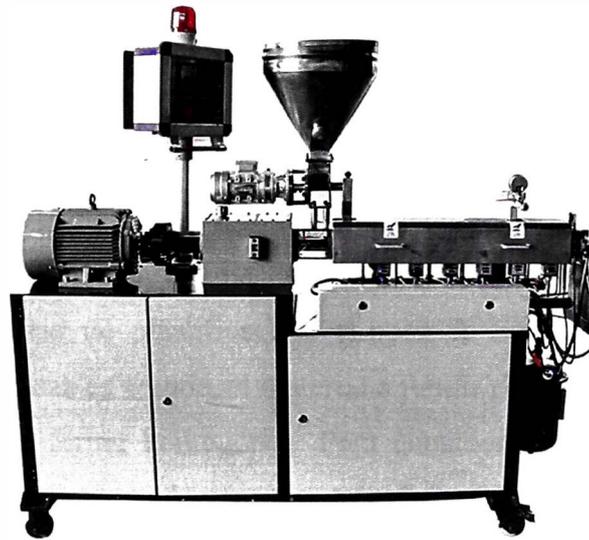
- Los que presentan incorporaciones o modificaciones en fábricas, realizadas por el departamento técnico o de ingeniería de la empresa.
- Incremento en la capacidad productivas por crecimiento de la demanda, es este tipo se incrementan la producción en diferentes áreas realizándose cambios en el proceso productivos o cambios menores en el diseño del producto, se suele realizar cambios en el suministro y diseño de los proveedores.
- Incorporación de nuevos procesos que involucran trabajos de investigación en los laboratorios, se desarrollan sistemas o plantas pilotos de procesos de producción o comerciales. En este tipo se desarrollan diagramas de procesos unitarios en la revisión de los diseños.

Generalmente los ingenieros de diseños en la etapa de innovación utilizan diseños existentes y tecnología de vanguardia, en la creación de nuevos procesos que conlleven a aumentar la productividad.

Con la finalidad de llevar a cabo la investigación presente se sigue de manera secuencial los siguientes enunciados:

- Obtención y preparación de las muestras del material de estudio
- Caracterización de las láminas de acuerdo a los ensayos de tracción, dureza e impacto
- Evaluación del comportamiento a fractura con la disminución de la temperatura en láminas adicionando un copolímero de polipropileno-etileno en porcentajes de 5, 10 y 15%
- Balance de materia y energía de acuerdo a una eficiencia del equipo en 95%.
- Análisis económico de la aplicación de una planta piloto correspondiente a láminas de polipropileno con adicción de copolímeros de polipropileno-etileno

Para el balance de materia y energía en la extrusora, se hicieron uso de datos correspondientes a dimensiones de una extrusora de laboratorio de baja capacidad y mono tornillo. Además de incorporar los datos de temperatura del material a utilizar, como lo es polipropileno. Simularemos en una extrusora de laboratorio (ver Figura 35), utilizando como base teórica a (Vélez & Sinche, 2014).



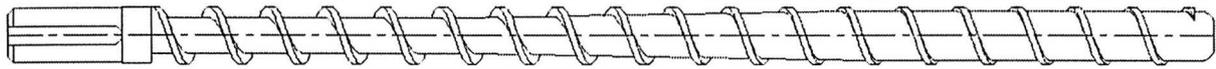
**Figura 35. “Extrusora de laboratorio”**  
 Fuente: (Nanjiing Haisi Extrusion Equipment Co., Ltd., 2022)

#### 3.4.1.1. Rasgos del Tornillo de extrusión

El tornillo utilizado para los procesos de extrusión alcanza particularidades especiales, esto debido a la geometría a la cual fue diseñada (ver Figura 36), sin embargo, es de destacar que estos poseen elementos considerables comunes en cualquier equipo de diseño.

**Tabla 9**  
*Especificaciones del tornillo extrusión*

Especificaciones	Valor
Longitud	600 mm
Diámetro	20 mm
L/d	30
Ancho del filete	2,2 mm
Profundidad de la canal	0,9 - 2 mm



**Figura 36.** “Tornillo de extrusora”

Fuente: (Lopez & Forero, 2022)

### 3.4.1.2. Relación de L/D

Uno de los parámetros utilizados en los diseños de extrusoras es la relación L/D, ya que permite obtener la capacidad de plastificación. (Lopez & Forero, 2022) explican que “Mientras el tamaño de la pieza es grande, el material a fundir pasara más tiempo dentro del cilindro hasta conseguir su forma homogénea. Para consideraciones corrientes se suele utilizar un L igual a 20 D es para grandes producciones.”

$L/D =$  Relación del tornillo

Donde:

L: Longitud del tornillo

D: Diámetro exterior

### 3.4.2. Balance de Materia

La materia que entra en la extrusora a través de la tolva, debe salir por la boquilla o acumularse dentro de maquinaria, con un valor pequeño para así definir el proceso como eficiente.

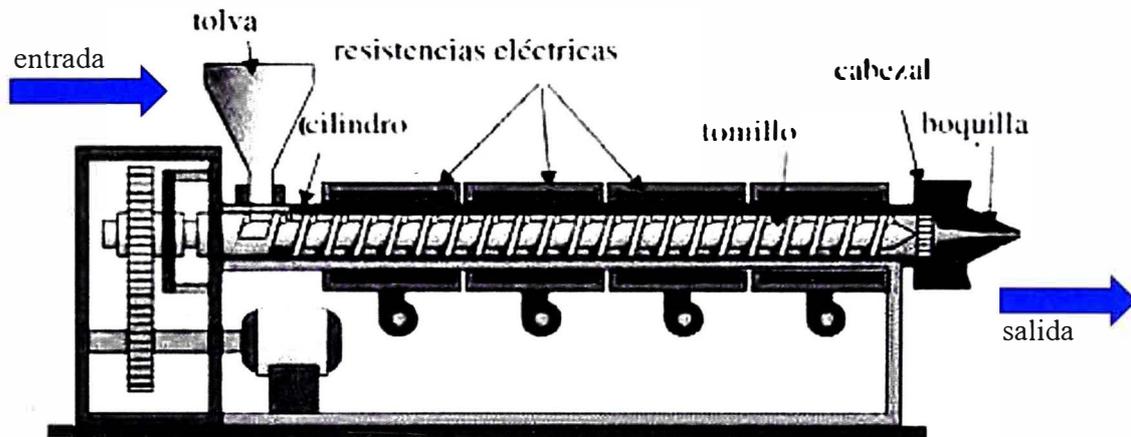


Figura 37. “Máquina extrusora”  
Fuente: (Poalacin, 2019)

La ecuación de balance de materia se rige como:

$$E_{masa} = S_{masa} + A_{masa} \quad (1)$$

Donde, “la entrada de la cantidad de masa inicial ( $E_{masa}$ ), la salida de la misma cantidad de masa inicial ( $S_{masa}$ ), la masa que se queda obstruida en la extrusora ( $A_{masa}$ )” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 55).

Para poder determinar estos valores nos valemos de las características del extrusora a saber y saber la cantidad de la masa inicial tenemos, mediante los datos del flujo volumétrico.

$$Q = \frac{\alpha * k}{k + \beta + \gamma} * n \quad (2)$$

Donde, “el flujo volumétrico o flujo másico de entrada ( $Q$ ), el flujo de arrastre de fricción ( $\alpha$ ), la constante de la cabeza de la extrusora ( $k$ ), flujo de presión ( $\beta$ ), revoluciones del husillo ( $n$ ), flujo de filtración ( $\gamma$ )” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 50)

Ahora bien, a fin de calcular cada uno de estos parámetros se tiene:

### 3.4.2.1. Flujo de arrastre de fricción

Viene dado por:

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h * \left(\frac{t}{m} - e\right) \cos^2(\varphi)}{2} \quad (3)$$

Donde, “el flujo de arrastre de fricción ( $\alpha$ ) en  $\text{cm}^3$ , se determina mediante el número de canales del husillo de la extrusora ( $m$ ) es igual a 2.0, el diámetro del husillo ( $D$ ) es igual a 2.0 cm, la profundidad del canal de bombeo ( $h$ ) es igual 0.1 cm, dimensión del paso del husillo ( $t$ ) es igual a 3.6 cm, anchura de la creta del filete de corte ( $e$ ) es igual a 0.9 cm, ángulo de la hélice del canal ( $\varphi$ ) es igual a  $17.65^\circ$  valor estándar” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 72).

Sustituyendo en la Ecuación 3.

$$\alpha = \frac{\pi * 2 * 2,0 * 0,1 * \left(\frac{3,6}{1} - 0,9\right) \cos^2(17,65)}{2}$$

$$\alpha = 1.54 \text{ cm}^3$$

### 3.4.2.2. Flujo de presión

Ahora bien, para determinar el valor de  $\beta$

$$\beta = \frac{m * h^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \text{sen}\varphi * \text{cos}\varphi}{2 * L} \quad (4)$$

Donde, “flujo de presión en  $\text{cm}^3$  ( $\beta$ ), se determina mediante las variables: números de canales del husillo de la extrusora ( $m$ ) es igual a 2.0, profundidad del canal de bombeo ( $h$ ) es igual a 0.1 cm, dimensión del paso del husillo ( $t$ ) es igual a 3.6 cm, anchura de la creta del filete

de corte (e) es igual a 0.9 cm, ángulo de la hélice del canal (17, 65°) valor estándar ( $\varphi$ ), longitud del husillo (L) es igual 60 cm” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 48)

Sustituyendo en la Ecuación 4.

$$\beta = \frac{2 * 0,1^3 * \left(\frac{3,6}{2} - 0,9\right) * \text{sen}(17,65) * \text{cos}(17,65)}{2 * 60}$$

$$\beta = 4.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

### 3.4.2.3. Flujo de filtración

El flujo de filtración  $\gamma$  viene dado por la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \text{tag}\varphi}{10 * e * L} \quad (5)$$

Donde, “el flujo de filtración ( $\gamma$ ) en  $\text{cm}^3$ , se determina mediante diámetro del husillo (D) es igual a 2.0 cm, holgura el filete ( $\delta$ ) es igual a 0.002D que equivale a 0.0044, anchura de la creta del filete de corte (e) es igual a 0,2 cm, ángulo de la hélice del canal ( $\varphi$ ) valor estándar de 17.65°, longitud del husillo (L) es igual a 60.0 cm” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 49).

Sustituyendo en la Ecuación 5.

$$\gamma = \frac{\pi^2 * (2,0)^2 * (0,0040)^3 * \text{tag}(17,65)}{10 * 0,9 * 60}$$

$$\gamma = 1.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^3$$

### 3.4.2.4. Constante de la cabeza de la extrusora

Igualmente, para calcular el valor de k, se tiene según Savgorodny, es un coeficiente de la forma geométrica en el cabezal de donde parte la siguiente expresión:

$$k = \frac{\pi * d^4}{128 * l} \quad (6)$$

Donde, “constante total de la cabeza en  $\text{cm}^3$  (k), diámetro del canal del dado (d) igual a 5.0 cm, longitud del canal del dado (l) es igual a 4.0 cm, por lo general se utiliza en extrusores de tornillo simple” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 49).

Sustituyendo en la Ecuación 6.

$$k = \frac{\pi * 5,0^4}{128 * 4}$$

$$k=3.83 \text{ cm}^3$$

#### 3.4.2.5. Revoluciones del husillo de la extrusora

Para calcular n o las revoluciones del husillo se tiene:

$$n = \frac{V * h_2 * s}{\pi * D} \quad (7)$$

Donde, revoluciones del husillo en rpm (n), se determina mediante las variables: velocidad de cortadura en  $100\text{s}^{-1}$  (V), se determina mediante la profundidad del canal en la zona de extrusión ( $h_2$ ) es igual a 0.8 mm, diámetro del husillo (D) es igual a 20 mm, tiempo (s) es igual a 1s (Vélez & Sinche, 2014, pág. 50).

Sustituyendo en la Ecuación 7.

$$n = \frac{100 * 0,8 * 1}{\pi * 20}$$

$$n = 1,27 \frac{Rev}{s} * \frac{60s}{1min} = 76.4 \text{ rpm}$$

Ahora a fin de predecir la masa de entrada teórica de la ecuación de flujo y los valores obtenidos se sustituyen en esta misma ecuación y se tiene:

$$Q = \frac{\alpha * k}{k + \beta + \gamma} * n \quad (8)$$

Dónde: “flujo volumétrico (Q) en cm<sup>3</sup>/min, se determina mediante las variables: flujo de arrastre de fricción ( $\alpha$ ) que es igual 0.77 cm<sup>3</sup>, constante de la cabeza de la extrusora (k) es igual 3.83 cm<sup>3</sup>, flujo de presión ( $\beta$ ) es igual 6.5x10<sup>-6</sup> cm<sup>3</sup>, flujo de filtración ( $\gamma$ ) es igual 1.5x10<sup>-9</sup> cm<sup>3</sup>, revoluciones del husillo de la extrusora (n) es igual a 76.4 rpm” (Vélez & Sinche, 2014, pág. 50)

Sustituyendo en la Ecuación 8.

$$Q = \frac{1.54 * 3.83}{3.83 + 4.3 \times 10^{-3} + 1.5 \times 10^{-9}} * 76.4$$

$$Q = 117.7 \text{ cm}^3/\text{min}$$

Ahora utilizando la densidad del PP se tiene

$$m = \rho * Q$$

$$\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$$

$$m = 0,9 \text{ g/cm}^3 \times 117.7 \text{ cm}^3/\text{min} = 105.9 \text{ g/min} = 6.4 \text{ kg/h}$$

$$E_{\text{masa entrada}} = 6.4 \text{ kg/h}$$

Si la eficiencia teórica es de 95% entonces  $S_{\text{masa salida}} = 6.1 \text{ kg/h}$

$$E_{\text{masa entrada}} = S_{\text{masa salida}} + A_{\text{masa extrusora}}$$

$$\rightarrow A_{\text{masa extrusora}} = E_{\text{masa entrada}} - S_{\text{masa salida}}$$

Y la masa  $A_{\text{masa extrusora}} = 0,3 \text{ Kg/h}$

### 3.4.3. Balance de energía

En un sistema estacionario sin acumulación de energía ni intercambio de materia en los alrededores se tiene la siguiente ecuación:

$$Q + W = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H \quad (9)$$

Donde se tiene que la sumatoria del calor requerido ( $Q$ ) y el trabajo de desplazamiento ( $W$ ) es igual a la suma de la energía cinética ( $\Delta E_k$ ), la energía potencial ( $\Delta E_p$ ) y la energía de entalpía ( $\Delta H$ ).

Por lo que el balance de energía a aplicar para un modelo de extrusora de laboratorio, sin reacción química, donde no se presenta cambios de energía cinética y potencial, ni trabajo de desplazamiento, la ecuación general queda de la siguiente manera.

$$Q = \Delta H$$

Entonces, tenemos que,

$$Q = Q_{TOTAL} = Q_n + Q_c + Q_r + Q_p \quad (10)$$

Donde en calor requerido ( $Q$ ) es la sumatoria del calor necesario para la temperatura de extrusión ( $Q_n$ ), la pérdida de calor por conducción ( $Q_c$ ), la pérdida de calor por radiación ( $Q_r$ ) y el calor presente en el sistema ( $Q_p$ ).

Se tiene que el calor presente por radiación en los equipos de extrusión son pocos comunes o insignificantes. La Ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$Q = Q_{TOTAL} = Q_n + Q_c + Q_p \quad (11)$$

### 3.4.3.1. Pérdidas de calor por Conducción

Es el calor que se pierde en los extremos que están en contacto con otros espacios del equipo, se tiene que el calor que entrar dentro a través del cilindro a través mediante las bandas de resistencias que se encuentran en toda el área superficial del protector o camisa, estas pérdidas se encuentran en general cerca de la tolva, el reductor de velocidad y los soportes.

$$Q_c = h_c \cdot \Delta T \cdot S \quad (12)$$

$h_c$ : Coeficiente de convección.

$\Delta T$ : Delta de temperatura.

S: Área en contacto de transferencia de calor.

$$S = \pi \cdot \phi \cdot L \quad (13)$$

Sustituyendo en la Ecuación 13:

$$S = \pi \cdot (0,020) \cdot (0,6) = 0,038 \text{ m}^2$$

Pero aún no se conoce el valor del coeficiente de convección.

### **Determinación del Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección**

El parámetro de transferencia de calor por convección es calculado de manera experimental dado que su valor depende del entorno en donde se está realizando el cambio de energía, además de ser correspondiente a los cambios que experimenta el cuerpo sólido y como se encuentra físicamente constituido, tal como su geometría, el movimiento del fluido que pasa por el mismo, las propiedades y la velocidad de transferencia al cual está sometido.

Para comenzar se revisaron las propiedades del aire a una temperatura media del cuerpo de estudio, vamos a trabajar tomando como referencia las variables para calcular el número de Grashof<sup>2</sup>, del libro mecánica de fluidos (Cengel & Cimbala, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 2006).

Una vez obtenido el número de Grashof, es posible calcular el número de Prandtl, este número adimensional que se encuentra relacionado con la convección de calor, el mismo consigue mediante la tabla propiedades del aire, usando la temperatura media del material. Además, se tiene que la combinación entre el número de Grashof y el número de Prandtl, arroja el número de Rayleigh, el cual expresa la relación de flotabilidad y la viscosidad presente en el fluido de estudio.

El número Grashof ( $Gr_L$ ) con un valor de  $1,0955 \times 10^6$ , según la Tabla 10, le corresponde un número Prandtl ( $Pr$ ) con un valor de 0.7065.

**Tabla 10**  
 "Propiedades del aire a 1 atm a 125 °C"

Temperatura °C	Conductividad térmica $\frac{W}{m.K}$	Viscosidad cinemática $\frac{m^2}{s}$	Número de Prandlt
125	0,03269	$2,577 \times 10^{-5}$	0,7065

Fuente: "Tabla A-9" (Cengel & Cimbala, Mecanica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 2006)

El número Rayleigh, se obtiene como producto del número Grashof ( $Gr_L$ ) y del número Prandlt ( $Pr$ ).

$$Ra_D = Gr_L \cdot Pr$$

Sustituyendo en la Ec

$$Ra_D = (1,0955 \times 10^6) \cdot (0,7065)$$

$$Ra_D = 0,7740 \times 10^6$$

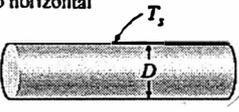
Una vez conocido el valor de Rayleigh y de Prandlt, se logra calcular el número de Nusselt.

**Número de Nusselt**

$$Nu = \frac{h L_c}{k}$$

Donde k representa la conductividad térmica del fluido y  $L_c$  es la longitud característica.

**Tabla 11**  
 "Número Nusselt para convección natural sobre superficies"

TABLA 9-1			
Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies			
Configuración geométrica	Longitud característica $L_c$	Intervalo de Ra	Nu
Cilindro horizontal 	$D$	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (9-25)$

Fuente: (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y de masa, 2011)

En el caso de cilindro circular se determinó el número de Nusselt

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 (0,7740 \times 10^6)^{1/6}}{[1 + (0.559/0,7065)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 13,52$$

El número de Nusselt permite calcular el coeficiente de convección libre, en el procedimiento de cálculo de pérdidas de calor del sistema.

$$Nu = \frac{h L_c}{k}$$

Obteniendo  $h$ ,

$$h = \frac{Nu * k}{L_c} = \frac{13,52 * 0,03269}{0,052}$$

$$hc = 8,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Se tiene que  $Q_c = hc \cdot \Delta T \cdot S$

$$Q_c = 8,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} * (503,15 - 293,15) \text{ K} * 0,038 \text{ m}^2 = 67,8 \text{ W (vatio)}$$

### 3.4.3.2. Calor Requerido para Elevar el Material a la Temperatura de Extrusión

$$Q_n = dm/dt \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

$Q_n$ : Cantidad de calor necesaria por el polímero.

$dm/dt$ : Flujo másico de material de la extrusora. = 6.4 kg/h

$C_p$ : Calor específico del PP a 230 °C. = 1.88 KJ/Kg. °C

$T_s$ : Temperatura de extrusión del PP. = 230°C

$T_\alpha$ : Temperatura de entrada del material. = 20°C

$$Q_n = (6.4 \text{ kg/h}) \cdot (1.88 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}) \cdot (230-20) ^\circ\text{C} = 2526,7 \text{ KJ/h} = 701.9 \text{ W (vatio)}$$

### 3.4.3.3. Calor presente en el sistema

Es el calor que las resistencias deben transmitir al cilindro para alcanzar la temperatura de transición vítrea, temperatura a la cual el material cambiará de estado sólido a líquido.

Para un volumen del cilindro o camisa ( $V_{ci}$ ) igual a  $0.62 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  y un tiempo de residencia de la mezcla de ( $T$ ) de 56.54 s obtenemos un flujo de calor presente en el sistema ( $Q_p$ ) de 336.3W.

### 3.4.3.4. Calor total

Ahora para calcular,  $Q = Q_{TOTAL} = Q_n + Q_c + Q_p$

$$Q_c = 67,8 \text{ W}$$

$$Q_p = 336.3 \text{ W}$$

$$Q_n = 701,9 \text{ W}$$

$$Q = Q_{TOTAL} = 67.8 + 336.3 \text{ W} + 701.9 = 1106 \text{ W}$$

La energía calorífica necesaria para que las resistencias puedan fundir el material plástico en el interior del cilindro de extrusión y así pueda ser extruido es de 1106 W (vatios)

### 3.4.3.5. Cálculo de la potencia de extrusión

Cálculo de la potencia necesaria (N) para la extrusión de material a producir, a partir de las revoluciones del tornillo ( $\eta = 76,4 \text{ rpm}$ ), constante de proporcionalidad (K) igual 66.7 y diámetro del husillo (D) igual a 20 mm.

$$N = \frac{\eta \cdot \pi \cdot D^3}{K^2}$$

Dónde: K= 66.7 factor de proporcionalidad

$$N = \frac{76,4 \cdot \pi \cdot (20 \text{ mm})^3}{66,7^2}$$

$$N=431.6 \text{ watts} = 0.60 \text{ HP}$$

### 3.4.4. Rendimiento producción del polímero + copolímero random

Es la cantidad de producto total extrusado que se obtendrá luego de pasar por la máquina en los diversos ciclos.

$$\%R = \frac{\text{Cantidad de polímero obtenido}}{\text{Cantidad de material inicial}} * 100\%$$

Donde:

% Rendimiento Total = Porcentaje de Rendimiento de todo el proceso (%)

Cantidad de polímero obtenido = Peso del producto final (Kg)

Cantidad de material inicial = Peso del PP al inicio del proceso (Kg)

### 3.5. Análisis Económico

La finalidad en este de investigación es estudiar a nivel de laboratorio de los materiales plásticos, no se ha realizado pruebas pilotos por la naturaleza del trabajo de investigación: Por lo tanto, solo es una referencia la evaluación económica, se refleja los materiales necesarios para la elaboración de láminas de polipropileno con adición de copolímero, para uso de fabricación.

### 3.5.1. Requerimientos del proyecto

Los materiales utilizados en este proceso son

**Tabla 12**  
*Requerimientos del proceso*

<b>Materia prima</b>	<b>Equipos</b>
Polipropileno	Extrusor de un solo tornillo
Copolímero	
Aditivo UV	
Carbonato de calcio	

Para el proceso se hará uso de una extrusora de un solo husillo.

#### 3.5.1.1. Extrusora de husillo único

Es el tipo de extrusora más comúnmente utilizada, posee un solo husillo o tornillo, este se encuentra segmentado en cuatro zonas que abarcan la entrada de la materia prima y la salida de la mezcla fina, (Gomez & Gutierrez, 2007):

- Zona de alimentación: es la etapa donde se transporta la materia prima en forma de gránulos, además de ser donde comienza a subir la temperatura.
- Zona de compresión: Etapa en la cual los polímeros en forma de granos, se comprimen y se someten a fricción y esfuerzo cortante, para lograr la fusión
- Zona de distribución: es la zona donde la mezcla fundida toma una forma homogénea.
- Zona de mezcla: es una etapa opcional del proceso, en esta zona se realiza una intensa mezcla de material. No suele mucho recomendarse, ya que puede ocasionar roturas de material.

Los tornillos, pueden tener en el interior de las zonas principales elementos dispersivos, que ayuda a que los materiales no se aglomeren y tengan partículas pequeñas, y elementos de distribución que ayudan que los materiales se distribuyan en igual proporción.

### 3.5.2. Análisis de costos

### 3.5.2. Análisis de costos

#### 3.5.2.1. Costos de inversión

Para la producción del Polipropileno + copolímero random; máquinas para llegar al producto: Extrusora.

**Tabla 13**  
*Costos de inversión*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Total (\$ USD)</b>
Extrusora	1	9.000	9.000
Instalación	1	2.000	2.000
<b>Total (\$ USD)</b>			<b>11.000</b>

#### 3.5.2.2. Costos de operación mensual

Se calculan los costos de operación en la obtención del Polipropileno + copolímero random, Se procede a determinar para la planta la cantidad empleos directos y salarios mensuales integrales, la cantidad de hora diaria estimada es de 5, ya que se pretende producir 6,4 Kg por hora para 32 Kg de polímero al día

**Tabla 14**  
*Costos de Operaciones*

<b>Descripción</b>	<b># de personas</b>	<b>Sueldo unitario mensual</b>	<b>Total (\$ USD)</b>
Manipulador de la extrusora	1	400	400
Supervisor del proceso	1	700	700
<b>TOTAL (\$ USD)</b>			<b>1100</b>

### 3.5.2.3. Costos de materia prima mensual

Si se tiene que se llevara a cabo una producción diaria de 32 Kg de producto, correspondientes a 5 horas de trabajo, para los cálculos por un mes, considerando un trabajo de lunes a viernes, se tienen 20 días hábiles, lo que genera una producción de 640 Kg de polímero; tomando como referencia el costo de una mezcla a 15% de copolímero añadido se obtiene que el costo es 1.392 USD/Kg y un costo total de materia prima por mes de 890.9 USD.

### 3.5.2.4. Presupuesto

Para ejecutar el proyecto planteado es de carácter necesario, cubrir un análisis de inversión económica, considerando los costos y gastos adicionales correspondientes al proceso de elaboración y levantamiento de información de datos arrojados.

**Tabla 15**

*Detalle presupuestal*

<b>Actividad</b>	<b>Monto \$</b>
Caracterización de las probetas de PP	500
Caracterización de las probetas de la mezcla polipropileno + copolímero	1000
Molde para obtención de probetas	100
Mascarilla con filtros y guantes de temperatura	50
Costos de Inversión	11000
Costos de materia prima mensual	890.9
Costos de Operaciones	1100
Copias e impresiones	30
Empastados del proyecto	50
Otros gastos	350
<b>Total</b>	<b>15070.9</b>

### 3.5.2.5. Análisis de costos de proyecto de planta de extrusión

El costo más significativo dentro del proyecto, son los costos de inversión y recursos materiales, ya que estos aparte de ser importante en el desarrollo permanente de la producción, los materiales deben ser adquiridos constantemente con el fin de proporcionar

el flujo de producción al día. El cálculo de costos de 1 kilogramo de producto terminado se le consideran un 10% de pérdidas de material de acuerdo al 95% de eficiencia de la extrusora y un 5% correspondientes a las pérdidas al realizar modelamiento y acondicionamiento de las muestras.

Adicionalmente es de destacar que el consumo de energía eléctrica de una extrusora es elevado, ya que una extrusora pequeña de laboratorio puede llegar a tener una potencia del motor desde 200-250 KW y voltaje de 220V, de acuerdo a los datos proporcionados por (Nanjiing Haisi Extrusion Equipment Co., Ltd., 2022)

Para el año 2021 el precio del KWh de consumo en Perú era de \$ 0.216 USD, arrojando así un valor aproximado de consumo mensual en la plata piloto, se tiene que la potencia dividida por la producción obtenida en una hora, nos da la eficiencia energética.

$$N=431.6 \text{ watts} = 0.6 \text{ HP}$$

$$\text{Eficiencia} = 0.43 \text{ KW} / 6.4 \text{ Kg/h} = 0.1 \text{ KW.h/Kg}$$

Lo que quiere decir que por cada 1 kg de material extruido se tiene un gasto de energía de 0.1 kW/h. Dejando el consumo diario de energía, considerando una producción de 32 kg de material por 5 horas de trabajo en

$$\text{Consumo eléctrico} = 0.112 \text{ KW.h/kg} * 32 \text{ Kg} * 0.216\$/\text{KW.h} = 0.77\$\text{}$$

$$\text{Mensualmente } 15.5\$\text{}$$

Por otra parte el costo de caracterización de los materiales, es de gran gasto, debido que a medida de que se vayan realizando la producción, se debe realizar dichos análisis para asegurar la calidad del producto final, por lo que se recomienda inversión a largo plazo para realizar los análisis correspondientes dentro del espacio delimitado en la inversión inicial, con personal capacitado, con el fin de la optimización de la manufactura de las láminas de polipropileno con adición de copolímero.

## CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados serán mostrados en este capítulo, los cuales fueron recabados en fases lo que permitió un tratamiento sistemático de la información, para poder dar cumplimientos a los objetivos específicos.

### 4.1. Análisis de ensayos físicos-mecánicos

#### 4.1.1. Ensayo de tracción

**Datos finales de la prueba de tracción:**

**Tabla 16**

*Resultados de la prueba de tracción*

N° Probeta	Valores Resistencia a la Tracción			
	$\sigma_T$ (Mpa)			
	FORM A 0% COPOLÌMERO	FORM B 5% COPOLÌMERO	FORM C 10% COPOLÌMERO	FORM D 15% COPOLÌMERO
1	33,00	32,90	33,40	31,80
2	33,80	34,00	30,70	32,60
3	34,80	34,90	32,10	32,10
4	35,00	33,20	32,50	32,20
5	33,70	32,80	32,30	29,80
6	33,10	32,20	31,90	32,40
7	32,50	33,70	33,10	29,30
8	31,50	33,20	32,80	31,10
<b>Promedio</b>	<b>33,43</b>	<b>33,36</b>	<b>32,35</b>	<b>31,41</b>
	$\Delta$	-0,2%	-3,2%	-6,0%

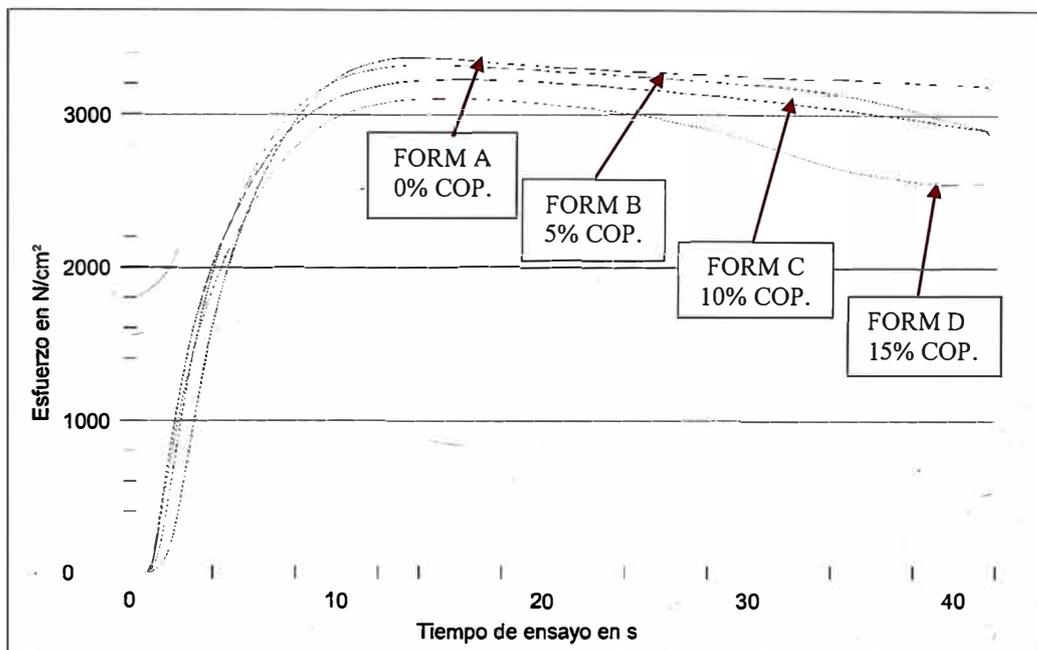


Figura 38. Gráfica de ensayo de tracción esfuerzo vs tiempo

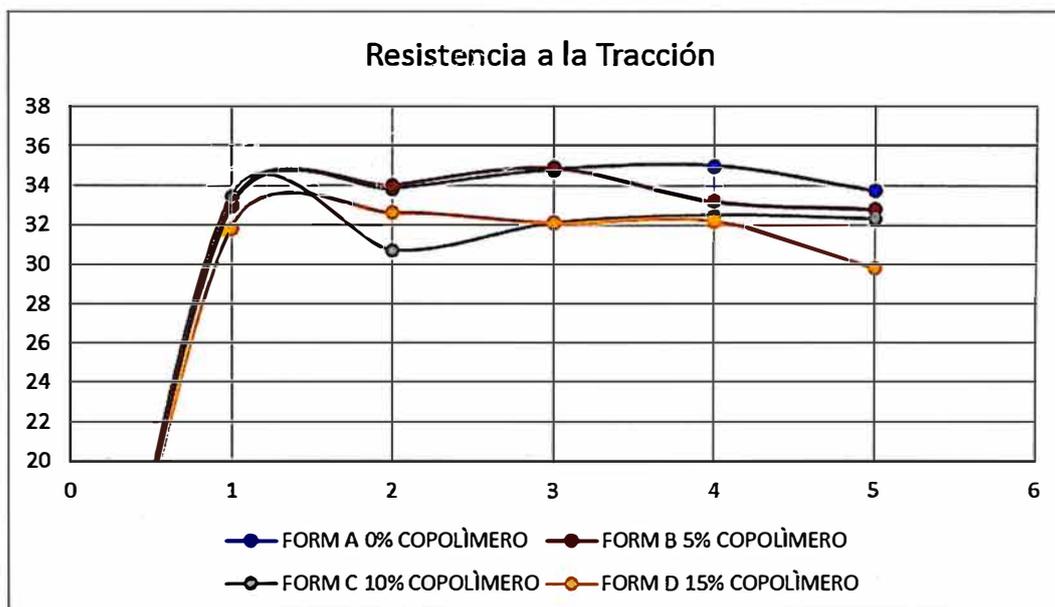


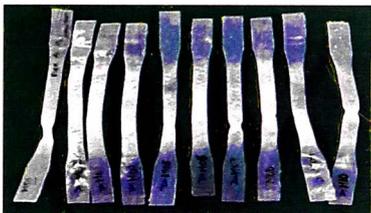
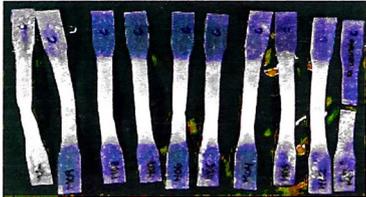
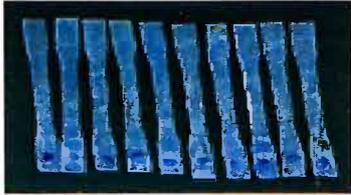
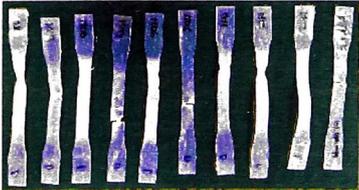
Figura 39. Gráfico valores de resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción obtenida  $\sigma_T$  es el valor del esfuerzo que soporta tras la tracción mecánica a valores máximos al cual se expone una probeta.

Se evalúa el comportamiento de resistencia

$$\sigma_{T_{FORM A}} > \sigma_{T_{FORM B}} > \sigma_{T_{FORM C}} > \sigma_{T_{FORM D}}$$

**Tabla 17**  
*Imágenes de las probetas antes y después del ensayo*

Formulación	Antes del ensayo	Después del ensayo
FORM A 0% COP.		
FORM B 5% COP.		
FORM C 10% COP.		
FORM D 15% COP.		

#### 4.1.2. Ensayo de dureza

Resultados del ensayo de dureza, en la Tabla 18, serán discutidos más adelante.

**Tabla 18**  
*Resultados de Dureza*

<b>Resultados de Dureza</b>				
<b>Unidad de dureza: shore</b>				
<b>N°</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Muestra</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>
	<b>COPOLÌMERO</b>	<b>COPOLÌMERO</b>	<b>COPOLÌMERO</b>	<b>COPOLÌMERO</b>
<b>1</b>	74,0	75,0	74,2	75,6
<b>2</b>	76,5	74,8	76,1	76,3
<b>3</b>	75,7	72,1	75,4	75,9
<b>4</b>	73,7	75,2	73,3	74,3
<b>5</b>	76,1	74,4	74,0	73,2
<b>6</b>	76,3	74,2	75,0	75,0
<b>7</b>	73,1	74,3	75,5	73,1
<b>8</b>	76,0	75,0	74,8	75,6
<b>9</b>	75,7	74,6	72,7	75,6
<b>10</b>	73,8	74,0	75,0	74,0
<b>promedio</b>	75,1	74,4	74,6	74,9

### 4.1.3. Ensayo de impacto

**Tabla 19**

Valores del ensayo a Impacto a  $T=0^{\circ}\text{C}$  (Sin cámara de degradación)

<b>T= 0°C</b>	MUESTRA	<b>A</b>				<b>B</b>				<b>C</b>				<b>D</b>				Sin cámara de degradación
		h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	
	1	0,06	1	0,6	No rompe	0,075	1	0,7	No rompe	0,1	1	0,98	Rompe	0,105	1	1,03	Rompe	
	2	0,05	1	0,5	No rompe	0,07	1	0,7	No rompe	0,095	1	0,93	Rompe	0,100	1	0,98	Rompe	
	3	0,07	1	0,7	No rompe	0,075	1	0,7	No rompe	0,1	1	0,98	Rompe	0,100	1	0,98	Rompe	
	4	0,07	1	0,7	No rompe	0,07	1	0,7	No rompe	0,1	1	0,98	Rompe	0,100	1	0,98	Rompe	
	5	0,08	1	0,8	Rompe	0,06	1	0,6	No rompe	0,095	1	0,93	No rompe	0,100	1	0,98	Rompe	
	6	0,06	1	0,6	No rompe	0,075	1	0,7	No rompe	0,11	1	1,08	Rompe	0,098	1	0,96	No rompe	
	7	0,08	1	0,8	Rompe	0,09	1	0,9	Rompe	0,1	1	0,98	Rompe	0,100	1	0,98	Rompe	
	8	0,05	1	0,5	No rompe	0,1	1	1,0	Rompe	0,11	1	1,08	Rompe	0,098	1	0,96	No rompe	
	9	0,07	1	0,7	No rompe	0,08	1	0,8	No rompe	0,1	1	0,98	rompe	0,098	1	0,96	No rompe	
	10	0,075	1	0,7	Rompe	0,08	1	0,8	No rompe	0,095	1	0,93	No rompe	0,100	1	0,98	No rompe	
	11	0,075	1	0,7	Rompe	0,08	1	0,8	Rompe	0,09	1	0,88	No rompe	0,110	1	1,08	Rompe	
	12	0,1	1	1,0	Rompe	0,08	1	0,8	Rompe	0,09	1	0,88	No rompe	0,090	1	0,88	No rompe	
	13	0,2	1	2,0	Rompe	0,08	1	0,8	Rompe	0,2	1	1,96	Rompe	0,095	1	0,93	No rompe	
	14	0,2	1	2,0	Rompe	0,08	1	0,8	Rompe	0,08	1	0,78	No rompe	0,097	1	0,95	No rompe	
	15	0,06	1	0,6	No rompe													
		PROMEDIO		0,60		PROMEDIO		0,72		PROMEDIO		0,88		PROMEDIO		0,95		
		MAXIMO		0,69		MAXIMO		0,78		MAXIMO		0,93		MAXIMO		0,98		

Tabla 20

Valores del ensayo a Impacto a  $T=23^{\circ}\text{C}$  (Sin cámara de degradación)

T= 23°C	MUESTRA	A				B				C				D				Sin cámara de degradación
		h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	
	1	0,67	1	6,6	Rompe	0,70	2	13,73	Rompe	0,70	1	6,87	No rompe	0,58	2	11,38	Rompe	
	2	0,65	1	6,4	No rompe	1,80	1	17,66	Rompe	0,50	2	9,81	No rompe	0,52	2	10,2	No rompe	
	3	0,70	1	6,9	Rompe	1,50	1	14,72	Rompe	0,52	2	10,20	No rompe	0,54	2	10,59	No rompe	
	4	0,55	1	5,8	No rompe	0,50	2	9,81	No rompe	0,50	2	9,81	No rompe	0,60	2	11,77	No rompe	
	5	0,68	1	6,7	No rompe	0,45	2	8,83	No rompe	0,50	2	9,81	No rompe	0,52	2	10,2	No rompe	
	6	0,70	1	6,9	Rompe	1,00	1	9,81	No rompe	0,60	2	11,77	Rompe	0,52	2	10,2	No rompe	
	7	0,65	1	6,4	No rompe	1,00	1	9,81	No rompe	0,54	2	10,59	No Rompe	0,50	2	9,81	No rompe	
	8	0,70	1	6,9	Rompe	0,60	2	11,77	Rompe	0,65	2	12,75	Rompe	0,60	2	11,77	No rompe	
	9	0,60	1	5,9	No rompe	0,80	1	7,85	No rompe	0,60	2	11,77	rompe	0,57	2	11,18	No rompe	
	10	0,65	1	6,4	No rompe	0,57	2	11,18	Rompe	0,52	2	10,20	No rompe	0,55	2	10,79	No rompe	
	11	0,64	1	6,3	No rompe	0,52	2	10,20	Rompe	0,50	2	9,81	No rompe	0,60	2	11,77	Rompe	
	12	0,63	1	6,2	No rompe	0,60	2	11,77	Rompe	0,48	2	9,42	No rompe	0,50	2	9,81	No rompe	
	13	0,68	1	6,7	Rompe	0,70	1	6,87	No rompe	0,45	2	8,83	No rompe	0,56	2	10,99	No rompe	
	14	0,66	1	6,5	No rompe	0,45	2	8,83	No rompe	0,70	2	13,73	Rompe	0,57	2	11,18	No rompe	
	15	0,7	1	6,9	Rompe	0,70	2	13,73	Rompe	0,65	2	12,75	Rompe	0,60	2	11,77	Rompe	
		PROMEDIO		6,3		PROMEDIO		8,8		PROMEDIO		9,5		PROMEDIO		10,7		
		MAXIMO		6,7		MAXIMO		9,8		MAXIMO		10,6		MAXIMO		11,8		

**Tabla 21***Valores del ensayo a Impacto a T=23°C (con cámara de degradación)*

T= 23°C	MUESTRA	A				B				C				D				Con cámara de degradación
		h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	h (m)	m (Kg)	E (J)	RESULTADO	
	1	0,65	1	6,4	Rompe	0,55	1	5,40	Rompe	0,45	1	4,41	rompe	0,35	2	6,867	Rompe	
	2	0,02	1	0,2	Rompe	0,05	1	0,49	Rompe	0,03	1	0,29	rompe	0,03	2	0,589	Rompe	
	3	0,10	1	1,0	Rompe	0,02	1	0,20	no rompe	0,03	1	0,29	no rompe	0,04	2	0,687	no rompe	

La cámara de degradación acelera el proceso de envejecimiento del material, simulando una aceleración del tiempo de exposición de este.

#### 4.2. Comportamiento a fractura con la disminución de la temperatura

En esta parte se evaluó el comportamiento a fractura con la disminución de la temperatura en láminas adicionando un copolímero de polipropileno-etileno en porcentajes de 5, 10 y 15% y determinación de la proporción óptima de los componentes de copolímero para la mejora de la resistencia.

**Tabla 22**

*Comparación ensayo de tracción con diferentes porcentajes de copolímero*

<b>Proporción Copolímero</b>	<b>Ensayo de Tracción</b>
Forma A 0% copolímero	33,43
Forma B 5% copolímero	33,36
Forma C 10% copolímero	32,35
Forma D 15% copolímero	31,41

Estos representan un 20% de importancia para la selección de composición de material.

**Tabla 23**

*Comparación ensayo de dureza con diferentes porcentajes de copolímero*

<b>Proporción Copolímero</b>	<b>Ensayo de dureza</b>
Forma A 0% copolímero	75,1
Forma B 5% copolímero	74,4
Forma C 10% copolímero	74,6
Forma D 15% copolímero	74,9

Estos representan un 20% de importancia para la selección de composición de material.

**Tabla 24**  
*Comparación ensayo de impacto con y sin cámara de degradación*

Proporción Copolímero	Ensayo de Impacto		
	T= 0°C	T=23°C (sin cámara de degradación)	T=23°C (Con cámara de degradación)
Forma A 0% copolímero	0.7	6.7	0.1
Forma B 5% copolímero	0.8	9.81	0.2
Forma C 10% copolímero	0.93	10.59	0.28
Forma D 15% copolímero	0.97	11.76	0.68

Estos representan un 60% de importancia para la selección de composición de material.

#### 4.3. Discusión de ensayos físicos-mecánicos

##### Ensayo de tracción:

En la Tabla 16, Resultados de la prueba de tracción, es posible apreciar como es el comportamiento físico de la lámina de polipropileno, al agregar un copolímero de polipropileno-etileno en diferentes proporciones, se genera una baja de la resistencia de tracción, este descenso es mayor respectivamente al adicionar el copolímero, el polipropileno alcanza valores con diferencia porcentual entre 0.2% al adicionar 10% de copolímero, 3% al agregar 15% de copolímero y 2.9% al adicionar 15 % de copolímero.

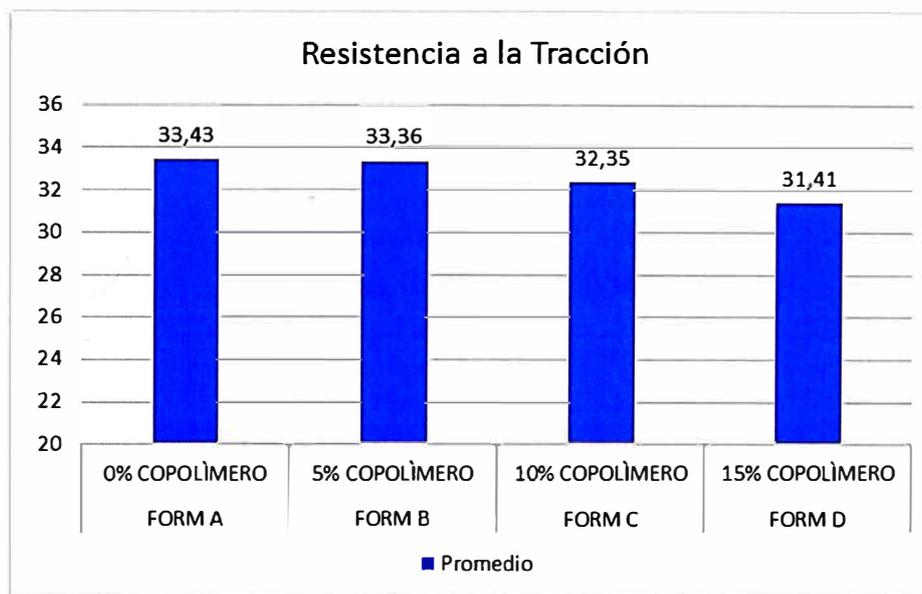


Figura 40. “Gráfico de resistencia a la tracción con diferentes formulaciones”

Se tiene que estudios previos de aditivos de compuestos con diferentes mezclas, Oksman como es citado en (Solís & Lisperguer, 2005) ellos mencionan que el aumento de la resistencia a la tracción, no marca un significado tan grande en la conclusión su trabajo y en cambio se necesita de una sustancia compatibilizadora o acoplante para conseguir valores significativos allí se trabajó con compuestos elaborados a partir de madera de *Pinus silvestris*, siendo combinado con polietileno de baja densidad (LDPE). Por lo que es de considerar que la adición del copolímero produce un descenso de la viscoelasticidad del material, ocasionando la dificultad de disipar la energía para sostener la resistencia tracción.

En las figuras 38 y 39 se muestran gráficamente el comportamiento mecánico de la resistencia de tracción de los ensayos, en donde la mezcla de polipropileno con adición de copolímero de propileno-etileno, apreciándose la curva de esfuerzo vs deformación, que permite evaluar la elasticidad de los materiales presentes. La figura 40 permite hacer una comparación precisa de la resistencia a la tracción y sus formas con proporción de agregado de copolímeros, mediante su valor promedio, apreciando la disminución de la resistencia.

#### Ensayo de Dureza:

En la Tabla 18. Resultados de Dureza, se aprecian los datos arrojados del ensayo aplicado a las muestras de material de polipropileno con adición de un copolímero de propileno-etileno

en diferentes proporciones, es de notar que los cambios correspondientes de los ensayos, no arrojan una amplia variedad, por el contrario, las muestras que contenían adición de copolímero arrojan datos cercanos a las muestras sin aditivo de copolímeros incluso un poco inferiores.

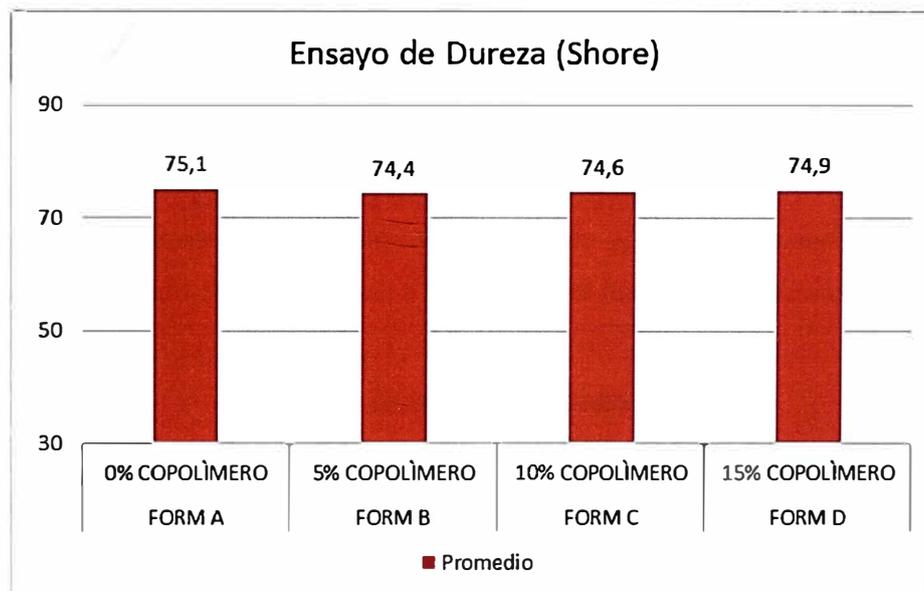


Figura 41. “Grafico comparativo ensayo de dureza en unidades shore”

La dureza de un material representa la medida de resistencia que tiene un cuerpo, en nuestro caso láminas de polipropileno con adición de copolímeros de polipropileno, a la compresión. El uso de estas evaluaciones permite además conocer sobre la resistencia al rayado, desgaste y abrasión, en la figura 43, es posible apreciar la dureza con diferentes formulaciones, sin adición de copolímero y con adición en diferentes proporciones.

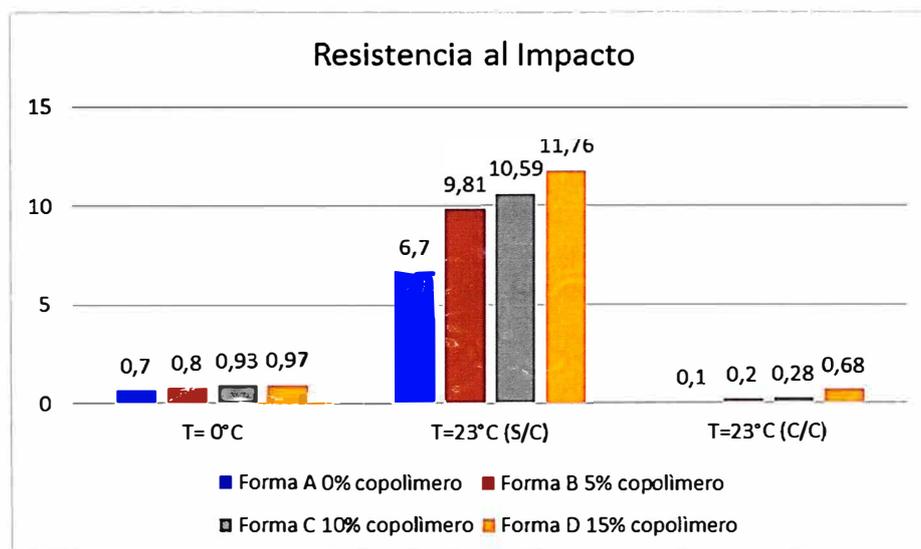
La variación de la dureza de un material va a depender de la relación elástica que presenta el mismo, la flexibilidad del polipropileno, de acuerdo con lo presentado, se tiene que la adición proporciona una disminución de la dureza, de acuerdo a lo arrojado, sin embargo, al aumentar el porcentaje de copolímero de polipropileno-etileno, se aprecia un ligero equilibrio, llegando a datos aproximados a los obtenidos sin adición de material.

### Ensayo de Impacto:

Es notable el aumento de resistencia al impacto al adicionar copolímero de polipropileno-etileno a el material de polipropileno, en la tabla 19 donde se trabaja el material a 0°C es

poco notorio la diferencia del cambio de resistencia al impacto, pues sin ninguna adición la ruptura se ubica apenas en 0.7 J, mientras que al adicionar 5% de copolímero de polipropileno-etileno, donde se aprecia el aumento de la resistencia en 0.8 J y de manera respectiva 0.93 y 0.97 con 10% y 15% de copolímero adicionado.

Al someterse a ensayo de ruptura con una temperatura de 23°C, sin cámara de degradación es apreciable de manera muy notoria el aumento de resistencia de impacto, en la tabla número 20, es posible apreciar los valores de límite máximo para soportar el impacto, observándose el cambio de Forma 0% donde arroja 6,7 J a 5% de adición a 9,81 %. La figura 36, gráfico de la resistencia de impacto, es posible apreciar de manera más visual la diferencia de aumento de la resistencia a sus diferentes temperaturas de ensayo.



**Figura 42.** Gráfico de resistencia al impacto a 0° y 23°C

En este caso se puede observar que al adicionar un copolímero de polipropileno a se presenta un incremento en la resistencia al impacto. Sin embargo, en la tabla numero 23 donde se realiza ensayo a 23°C con cámara de degradación, el valor límite de ensayo es muy bajo, incluso luego de adicionar el copolímero, se aprecia que son datos muy inferiores a los obtenidos sin cámara de degradación, en la figura 42, se aprecia el aumento de resistencia con respecto a las temperaturas estudiadas.

### **Evaluación del comportamiento a fractura con la disminución de la temperatura en láminas:**

Se tiene que la disminución de temperatura tiende a ser un problema para los materiales de uso exterior, lo cuales son fabricados de origen sintético, como el plástico, las láminas de polipropileno, tienden a tener este tipo de inconvenientes por la debilidad que tienen de acuerdo a la temperatura de transición vítrea, la cual tiende a limitar la resistencia a fractura a los 0°C, en los ensayos realizados, se es posible evaluar el comportamiento elasto-mecánico que sufre el polipropileno antes situaciones extremas, ya que el propósito de estas laminas, son crear una propuesta de prototipo que facilite el uso de este tipo de material para la elaboración de láminas para uso en viviendas.

La tabla 24. Comparativa de ensayos, muestra los valores arrojados al realizar los ensayos correspondientes y caracterizar las propiedades del material de estudio, estos pudiendo permitir una selección de material a adicionar para la mejora del producto presente, polipropileno, que permita brindar una solución a los problemas que actualmente presenta la elaboración de láminas con el material indicado.

### **Determinación de la proporción óptima de los componentes de copolímero para la mejora de la resistencia.**

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible determinar la proporción más óptimas la mejora de las láminas de polipropileno con copolímero de polipropileno-etileno, los datos arrojados sugieren que la Forma D con una adición de 15% de copolímero, es la más óptimas para la problemática presente, ya que como mencionado anteriormente, disminuye la resistencia a la tracción, se encuentra a un valor cercano a laminas sin copolímero en la resistencia a la dureza, mejora significativamente en los ensayos de impacto.

## CONCLUSIONES

- Se obtuvo un mejor comportamiento de la resistencia al impacto de una carga a 23°C, con 15% de copolímero adicionado, arrojando un promedio de 10.7 J (60% más), esto frente a los 6.7 J sin adición de copolímero, así como el mejor comportamiento elástico y plástico, sin adicionar copolímero 33.4MPa, verificándose que conforme incrementas copolímero la resistencia a la tracción disminuye.
- Al adicionar copolímero en proporciones de 5%, 10% y 15% se consigue mejorar la resistencia al impacto a 0 °C, siendo la de mejor comportamiento, la adición de copolímero al 15%, con resultandos de 38% (0.97J), por encima, de la formulación sin contenido de copolímero (0.70J). La dureza del material, está relacionado un tanto a la rigidez del material, concluyendo que tiene mayor rigidez cuando no se adiciona copolímero, arrojando un valor de 75.1 shore.
- Al someter las muestras en cámara de degradación durante 900 horas, se verifica la resistencia al impacto que se presenta a 23°C, observando que al dosificar mayor cantidad de copolímero, como un 15% de adición, se obtienen resultados promedios de (0.687 J), alrededor de tres veces más, que al adicionar 5% (0.20 J).
- De acuerdo a los estudios realizados se concluye que el resultando con mejor comportamiento mecánico ocurre al adicionar 15% de copolímero.

## RECOMENDACIONES

- Realizar análisis adicionales de los parámetros físicos y mecánicos de la materia prima de estudio con la finalidad de mejorar la proporción utilizada para las investigaciones relacionada al área de los polímeros.
- Realizar ensayos de impacto a temperaturas ambientales en la zona de distribución del material, para tener mejores referencias de un comportamiento real de las láminas elaboradas con materiales sintéticos como polipropileno.
- Experimentar con diferentes aditivos, como fibras naturales o sintéticas que puedan ayudar en la resistencia a bajas temperaturas combinándolas con copolímeros.

## BIBLIOGRAFIA

- Andina. (28 de Mayo de 2021). *Editora Perú*. Obtenido de Agencia Peruana de Noticias: <https://andina.pe/agencia/noticia-granizo-ate-mientras-caian-rayos-lima-video-846935.aspx>
- Araoz, C. (2018). *Evaluación de las propiedades mecánicas a bajas temperaturas de compuestos elaborados a partir de Polipropileno con Fibra de Abaca de Plátano*. Arequipa.
- ASTM International. (10 de Jul de 1998). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. *D 570 - 98*. United States: ASTM International.
- ASTM International. (1 de Nov de 2003). Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials. *D 785 - 03*. United States: ASTM International.
- ASTM International. (01 de Dec de 2003). Test Method for Tensile Properties of Plastics. *D 638 - 03*. United States: ASTM International.
- ASTM International. (1 de Feb de 2004). Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact). *D 5420 - 04*. United States: ASTM International.
- ASTM International. (15 de Aug de 2005). Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. *D 2240 - 05*. ASTM International.
- ASTM International. (15 de Aug de 2005). Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. *D 2240 - 05*. ASTM International.
- ASTM International. (1 de Aug de 2013). Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. *D1238 - 13*. United States: ASTM International.
- ASTM International. (9 de Sep de 2014). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. *Designation: D792 - 13*. United States: ASTM Int'l.

- Caicedo, C., Crespo, L., De La Cruz, H., & Álvarez, N. (2017). Propiedades termomecánicas del Polipropileno : Efectos durante el reprocesamiento. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 245-252.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y de masa*. Mexico DF: McGraw-Hill.
- Chemieuro. (2021). *Chemieuro | Venta, trading y distribución de Polímeros*. Obtenido de <https://www.chemieuro.com/es/catalogo-de-polimeros/poliolefinas/copolimero-de-polipropileno-ppc/>
- Decreto Supremo N°011. (2006). Carga viva del techo. *Reglamento Nacional de Edificaciones*, pág. art 7.
- Fabre, V., Bizzotto, M., & Tirner, J. (2010). Comportamiento Resistente de Suelos Orgánicos Estabilizados con Tanino. *Información Tecnológica*, 203-212.
- Gamez, J. (2017). *Relación estructura-propiedades en placas y láminas de polipropileno y copolímeros en bloque etileno-propileno obtenidas por diferentes procesos de transformación*. UPC. Lima.
- Gomez, J., & Gutierrez, J. (2007). *Diseño de una extrusora para plasticos*. Pereira.
- Lopez, S., & Forero, R. (2022). *Diseño y fabricacion de un equipo de Extrusion de filamento en polimero para impresion por MDF*. Santander.
- Martín, T. (2010). *Determinación de la tenacidad de fractura de polipropilenos a temperaturas criogénicas*. Madrid.
- Matos, M., Sánchez, J., Jiménez, M., Salas, L., & Santana, O. (2006). Propiedades mecánicas y comportamiento a fractura de un polipropileno homopolímero comparado con un copolímero de impacto grado comercial. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2005*, 31-45.
- Mexpolimeros. (29 de diciembre de 2021). *Mexpolimeros*. Obtenido de <https://www.mexpolimeros.com/modulo%20de%20traccion.html>

- Nanjiing Haisi Extrusion Equipment Co., Ltd. (29 de 07 de 2022). *Nanjiing Haisi Extrusion Equipment Co., Ltd.* Obtenido de <http://es.haisiextrusion.com/Mini-extrusora-y-extrusora-de-laboratorio-para-uso-de-laboratorio-pd47005154.html>
- Petrocuyo. (29 de diciembre de 2021). *Petrocuyo.* Obtenido de <http://www.petrocuyo.com/es/tecnologia/el-polipropileno>
- Poalacin, D. (2019). *Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de polipropileno (pp) reciclado mediante la adición de polietileno tereftalato reciclado (pet) por proceso de extrusión*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Ramos, S. (2018). *Implementación de material sintético polipropileno y residuo agroindustrial cachaza de caña en prototipo de material de construcción para uso en techos inclinados*. Ciudad Universitaria: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Solís, M., & Lisperguer, J. (2005). Resistencia al Impacto y a la Tracción de Materiales Compuestos Plástico-Madera. *Información Tecnológica*, 16(6), 21-25.
- Todo en Polimeros. (21 de diciembre de 2016). *Todo en Polimeros*. Obtenido de <https://todoenpolimeros.com/2016/12/21/transicion-vitrea/>
- Todo en Polimeros. (21 de diciembre de 2016). *Todo en Polimeros*. Obtenido de <https://todoenpolimeros.com/2017/01/04/la-resistencia-al-impacto/>
- Todo en Polimeros. (08 de abril de 2019). *Todo en Polimeros*. Obtenido de <https://todoenpolimeros.com/2019/04/08/el-rol-del-carbonato-de-calcio-en-los-plasticos/>
- Vásquez, W. (Febrero de 2020). Metodología de la Investigación. *Manual del Estudiante*. Santa Anita: UNIVERSIDAD DE SAN MARTÍN DE PORRES. Obtenido de <http://www.usmp.edu.pe/estudiosgenerales/>
- Vélez, E. O., & Sinche, B. F. (2014). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE TORNILLO PARA LA OBTENCIÓN DE PELLETS DE BOTELLAS PLÁSTICAS DE PET RECICLADAS. RIOBAMBA, RIOBAMBA, ECUADOR: PROPIO.

Yuly Catherine Borja Mejia, Sebastián Rodríguez Ariza, Jhon Cáceres. (2021). NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. *MATRIZ DE POLIPROPILENO*. BOGOTÁ, COLOMBIA.

Zwick Roell. (29 de diciembre de 2021). *Zwick Roell*. Obtenido de <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/ensayo-de-traccion-iso-527-1-2/>

## ANEXOS

## ANEXO 1: Tablas de las propiedades del aire a 1 atm de presión

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl $Pr$
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07865	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para gases ideales,  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y  $Pr$  son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de  $\rho$  a la temperatura dada por  $P$  (en atm) y cuando se dividen  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$  (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN D-306067020-8.

Fuente: (Cengel & Cimbala, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 2006)

**ANEXO 2: Plan de muestreo en inspección normal**

<b>Tabla general (Inspección Normal)</b>	
<b>Planes de muestreo</b>	
<b>Letra código tamaño de la muestra</b>	<b>Tamaño de la muestra</b>
A	2
B	3
C	5
D	8
E	13
F	20
G	32
H	0
J	80
K	125
L	200
M	315
N	500
P	800
Q	1250
R	2000