



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y
MECÁNICAS DE POLIPROPILENO (PP) RECICLADO
MEDIANTE LA ADICIÓN DE POLIETILENO TEREFALATO
RECICLADO (PET) POR PROCESO DE EXTRUSIÓN”**

Trabajo De Titulación:

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar por el grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: DANIELA VANESSA POALACIN BARRAGÁN

DIRECTOR: Msc. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES

Riobamba - Ecuador

2019

©2019, Daniela Vanessa Poalacin Barragán

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, DANIELA VANESSA POALACIN BARRAGÁN, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba, 12 de noviembre 2019.



Daniela Vanessa Poalacin Barragán

CI: 060403591-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Técnico, "MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL POLIPROPILENO (PP) RECICLADO MEDIANTE LA ADICIÓN DE POLIETILENO TEREFALATO RECICLADO (PET) POR PROCESO DE EXTRUSIÓN", realizado por la señorita DANIELA VANESSA POALACIN BARRAGÁN, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

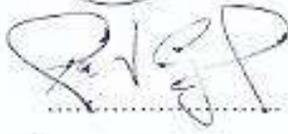
	FIRMA	FECHA
Dr. Bolivar Edmundo Flores Humanante PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		12/11/19
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		12/11/19
Dr. Robert Alcides Cazar Ramírez MIEMBRO DEL TRIBUNAL		12/11/19

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	3
1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Identificación del problema.....	3
1.2 Línea Base del Proyecto.....	5
1.3 Beneficiarios directos e indirectos.	5
1.3.1 <i>Beneficiarios Directos</i>	5
1.3.2 <i>Beneficiarios Indirectos</i>	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.5 Localización del proyecto.	7
CAPITULO II.	8
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1 Polipropileno (PP)	8
2.2 Polietileno Tereftalato (PET)	10
2.3 Compatibilizadores	11
2.3.1 <i>Anhídrido Ftálico</i>	12
2.4 Extrusión.....	13
2.5 Tipo de Estudio.....	15
2.6 Métodos	15
CAPITULO III.....	17
3. MARCO METODOLÓGICO.....	17
3.1 Obtención de probetas	17
3.1.1 <i>Proceso de Reciclaje</i>	17

3.1.2	<i>Obtención de las escamas de polipropileno reciclado (PP)</i>	17
3.1.3	<i>Obtención de las escamas de polietileno tereftalato reciclado (PET)</i>	18
3.1.4	<i>Extrusión del polipropileno reciclado</i>	18
3.1.5	<i>Extrusión de la mezcla de PP reciclado y PET reciclado</i>	18
3.1.6	<i>Moldeado por prensado</i>	19
3.1.7	<i>Caracterización de las probetas obtenidas</i>	19
3.2	Técnicas	20
3.2.1	<i>Reducción de tamaño</i>	20
3.2.2	<i>Extrusión de materiales</i>	20
3.2.3	<i>Ensayo de Flexión</i>	21
3.2.4	<i>Ensayo de Tracción</i>	22
3.2.5	<i>Ensayo de Compresión</i>	23
3.2.6	<i>Ensayo de Dureza</i>	23
3.2.7	<i>Microscopia Electrónica de Barrido</i>	24
3.2.8	<i>Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo (FTIR)</i>	25
3.3	Variables de Proceso	25
3.3.1	<i>Perfil de Temperatura</i>	25
3.3.2	<i>Porcentaje de PET reciclado añadido a la matriz de PP reciclado.</i>	26
3.3.3	<i>Porcentaje de compatibilizador (anhídrido ftálico).</i>	26
3.4	Cálculos de Ingeniería	28
3.4.1	<i>Flujo Volumétrico</i>	28
3.4.2	<i>Balance de masa</i>	29
3.4.3	<i>Rendimiento del proceso</i>	29
CAPITULO IV		30
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1	Caracterización de la materia prima	30
4.1.1	<i>Espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)</i>	32
4.1.2	<i>Ensayo de Flexión</i>	34
4.1.3	<i>Ensayo de Tracción</i>	35
4.1.4	<i>Ensayo de Compresión</i>	36
4.1.5	<i>Ensayo de Dureza</i>	37
4.1.6	<i>Microscopia Electrónica de Barrido</i>	37
4.2	Caracterización de probetas mezcla PP/PET	38
4.2.1	<i>Apariencia del material extruido.</i>	38
4.2.2	<i>Ensayo de Flexión</i>	39

4.2.3	<i>Ensayo de Tracción</i>	41
4.2.4	<i>Ensayo de Compresión</i>	44
4.2.5	<i>Ensayo de Dureza</i>	44
4.2.6	<i>Microscopia Electrónica de Barrido</i>	45
4.3	Análisis Comparativo	48
4.4	Caracterización de probetas mezcla PP/PET y anhídrido ftálico	52
4.4.1	<i>Ensayo de Flexión</i>	52
4.4.2	<i>Ensayo de Tracción</i>	53
4.4.3	<i>Ensayo de Compresión</i>	54
4.4.4	<i>Ensayo de Dureza</i>	54
4.4.5	<i>Microscopia Electrónica de Barrido</i>	55
4.5	Efecto del compatibilizador en la mezcla PP/PET	57
	CAPITULO V	59
5.	REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO	59
5.1	Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.	59
5.2	Análisis Costo/beneficio del proyecto.	60
5.2.1	<i>Presupuesto</i>	60
5.2.2	<i>Análisis de Costos</i>	61
	CONCLUSIONES	62
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Coordenadas geográficas del área.....	7
Tabla 1-2: Propiedades físicas del PP.....	10
Tabla 2-2: Características importantes de PET.....	11
Tabla 1-3: Reducción de tamaño y tamizado.....	20
Tabla 2-3: Extrusión de materiales.....	20
Tabla 3-3: Ensayo de Flexión.....	21
Tabla 4-3: Ensayo de Tracción.....	22
Tabla 5-3: Ensayo de Compresión.....	23
Tabla 6-3: Ensayo de Dureza (Shore).....	23
Tabla 7-3: Microscopia Electrónica de Barrido.....	24
Tabla 8-3: Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo (FTIR).....	25
Tabla 9-3: Perfiles de temperatura configurados.....	26
Tabla 10-3: Diseño Experimental I.....	27
Tabla 11-3: Diseño Experimental II.....	27
Tabla 12-3: Variables de diseño del extrusor monohusillo.....	28
Tabla 13-3: Datos experimentales del proceso de extrusión.....	29
Tabla 1-4: Dimensiones de las probetas PP reciclado.....	31
Tabla 2-4: Análisis estadístico de las dimensiones de las probetas PP.....	31
Tabla 3-4: FTIR polipropileno reciclado.....	33
Tabla 4-4: Informe de Resultados. Ensayo de Flexión PP.....	34
Tabla 5-4: Informe de Resultados. Ensayo de Tracción PP.....	35
Tabla 6-4: Informe de Resultados. Ensayo de Compresión PP.....	36
Tabla 7-4: Informe de Resultados. Ensayo de Dureza PP.....	37
Tabla 8-4: Apariencia del material extruido.....	38
Tabla 9-4: Informe de Resultados. Ensayo de Flexión PP/PET.....	39
Tabla 10-4: Informe de Resultados. Ensayo de Tracción PP/PET.....	41
Tabla 11-4: Informe de Resultados. Ensayo de Compresión PP/PET.....	44
Tabla 12-4: Informe de Resultados. Ensayo de Dureza Shore PP/PET.....	45

Tabla 13-4: Composición % de las mezclas PP/PET.....	45
Tabla 14-4: Comparación de las propiedades mecánicas obtenidas.....	49
Tabla 15-4: Informe de Resultados. Ensayo de Flexión PP/PET/Anhídrido Ftálico.....	53
Tabla 16-4: Informe de Resultados. Ensayo de Tracción PP/PET/Anhídrido Ftálico.....	53
Tabla 17-4: Informe de Resultados. Ensayo de Compresión PP/PET/Anhídrido Ftálico.....	54
Tabla 18-4: Informe de Resultados. Ensayo de Dureza Shore PP/PET/Anhídrido Ftálico.....	55
Tabla 19-4: Composición % de las mezclas PP/PET/Anhídrido Ftálico.....	57
Tabla 20-4: Comparación entre la mezcla con compatibilizador y sin acoplante.....	57
Tabla 1-5: Requerimientos de proceso.....	59
Tabla 2-5: Detalle Presupuestario.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Georreferenciación del laboratorio de Operaciones Unitarias. ESPOCH.....	7
Figura 1-2: Estructura química de propileno y polipropileno.....	8
Figura 2-2: Formas estructurales del polipropileno.....	9
Figura 3-2: Reacción para obtención de polietileno tereftalato.....	10
Figura 4-2: Estructura química del anhídrido ftálico.....	12
Figura 5-2: Sección transversal de una extrusora.....	13
Figura 6-2: Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo.....	14
Figura 1-3: Probeta tipo A para ensayos de tracción en plásticos.....	19
Figura 1-4: Representación dimensional de la probeta tipo A.....	30
Figura 2-4: FTIR polipropileno puro.....	32
Figura 3-4: FTIR polipropileno reciclado.....	33
Figura 4-4: SEM polipropileno reciclado.....	37
Figura 5-4: SEM probetas PP/PET. Perfil de temperatura B.....	46
Figura 6-4: SEM probetas PP/PET. Perfil de temperatura C.....	47
Figura 7-4: SEM probetas PP/PET/Anhídrido ftálico.....	56

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Curva Esfuerzo vs. Deformación unitaria de PP reciclado.....	36
Gráfico 2-4: Esfuerzo en la rotura [MPa] - % PP/PET.....	40
Gráfico 3-4: Modulo de elasticidad (Flexión) [MPa] – % PP/PET.....	41
Gráfico 4-4: Parámetros [MPa] – % PP/PET.....	42
Gráfico 5-4: Modulo de elasticidad (Tracción) [MPa] – % PP/PET.....	43
Gráfico 6-4: Curvas Esfuerzo [MPa] – Deformación Unitaria. Perfil de temperatura B.....	50
Gráfico 7-4: Curvas Esfuerzo [MPa] – Deformación Unitaria. Perfil de temperatura C.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROCESO

ANEXO B EQUIPOS DE ENSAYOS MECÁNICOS

ANEXO C ENSAYOS MECÁNICOS

ANEXO D PROBETAS PP/PET

ANEXO E PROBETAS PP/PET ENSAYO DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN

ANEXO F INFORME DE RESULTADOS TRACCIÓN

ANEXO G INFORME DE RESULTADOS FLEXIÓN

ANEXO H INFORME DE RESULTADOS COMPRESIÓN

RESUMEN

El presente estudio tiene por objeto el mejoramiento de las propiedades del polipropileno reciclado mediante la adición de polietileno tereftalato reciclado (PET) en varios porcentajes e incluyendo un agente acoplante como el anhídrido ftálico. Para ello se procedió a obtener escamas de los dos materiales previamente lavados y secados; la mezcla de polipropileno y polietileno tereftalato se alimentó en la tolva directamente, trabajando con tres perfiles de temperatura y diferentes porcentajes de PET propuestos (5%, 10%, 20% y 30%). A las probetas obtenidas bajo cada uno de estos parámetros se las sometió a ensayos mecánicos para su caracterización donde en base a los resultados obtenidos se definió el perfil de temperatura que mejor se ajustaba a las necesidades previstas, así las temperaturas de la tolva de alimentación a la boquilla fueron 155/190/190/190 °C respectivamente, y una velocidad del tornillo de 350 rpm; el porcentaje óptimo de PET determinado corresponde a la mezcla PP/PET-30%. Con estos parámetros se realizó una compatibilización de los materiales mediante la adición de anhídrido ftálico en porcentajes de 1%, 2% y 3% para determinar el comportamiento de la mezcla, evidenciando una mejora del 8% de resistencia al esfuerzo de tracción y del 56,81% en el parámetro de dureza.

Palabras Clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <POLIPROPILENO >, <POLIETILENO TEREFTALATO >, <EXTRUSIÓN >, <FLEXIÓN >, < TRACCIÓN >, < COMPATIBILIZADOR >



ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the properties of recycled polypropylene by adding recycled polyethylene terephthalate (PET) in several percentages and including a coupling agent such as phthalic anhydride. To do this we proceeded to obtain scales of the two materials previously washed and dried; the mixture of polypropylene and polyethylene terephthalate is fed into the hopper directly by working with three temperature profiles and different percentages of PET proposed (5%, 10%, 20% and 30%). The specimens obtained under each of these parameters were subjected to mechanical tests for their characterization where, based on the results obtained, the temperature profile that best suited the expected needs was defined, as well as the temperatures of the feed hopper to the nozzle were 155/190/190/190 °C respectively, and a screw speed of 350 rpm; the optimum percentage of PET determined corresponds to the mixture of PP / PET-30%. With these parameters a compatibility of the materials was made by adding phthalic anhydride in percentages of 1%, 2% and 3% to determine the behavior of the mixture, evidencing an improvement of 8% resistance to tensile stress and 56, 81% in the hardness parameter.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <POLIPROPYLENE>, <TEREFTALATE POLYETHYLENE>, <EXTRUSION>, <FLEXION> <TRACTION>, <COMPATIBILIZER>



INTRODUCCIÓN

La acumulación de los residuos plásticos afecta al país de la misma forma que al resto del mundo; ésta se ve favorecida por la poca cultura ambiental de la población, así como por la falta de programas de reciclaje dentro de las políticas ecuatorianas.

No obstante el reciclaje de los residuos plásticos a nivel nacional ha logrado varios avances en cuanto a las medidas para el aprovechamiento de los mismos. Conforme a los registros de la Superintendencia de Compañías, en el Ecuador existen 128 empresas establecidas legalmente dedicadas a la recuperación de dichos desechos.

Estos avances se basan en el Código Orgánico del Ambiente publicado en el Registro Oficial, suplemente 938 el 12 de abril de 2017 establece en su artículo número 3, numeral 9 el “Establecer los mecanismos que promuevan y fomenten la generación de información ambiental así como la articulación y coordinación de las entidades públicas, privadas y de la sociedad civil responsables de realizar actividades de gestión e investigación, de conformidad con los requerimientos y prioridades estatales”.

De igual forma en cuanto a políticas de reciclaje específicas se refiere, se debe mencionar primordialmente el Impuesto Redimible a las Botellas Plásticas no Retornables (IRBP), cuya finalidad es precisamente impulsar el proceso de reciclaje. El IRBP grava directamente a los recipientes cuya materia prima es netamente polietileno tereftalato o PET. Dicho impuesto tiene su base legal en la Ley de Fomento Ambiental y Optimización de los Ingresos del Estado S.R.O. 583 de 24-11-2011. Creación del IRBP.

A nivel gubernamental la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) instan a los gobiernos a fomentar los mercados de reciclado de plásticos enfatizando la poca área económica y de investigación que esta posee atribuyendo esto a la dificultad de separación y degradación que muchos de los polímeros utilizados presentan así como el costo que el plástico primario representa en términos de ganancia para las empresas incitando de igual manera a centros de investigación, laboratorios y universidades a mejorar los procesos y diseño de productos plásticos ya sea orientado a minorar su consumo o para facilitar su posterior tratamiento y disposición final con lo que mediante la presente investigación se busca superar barreras de tipo técnico existentes entre una gran gama de polímeros y aditivos en una economía de ingresos bajos como la ecuatoriana.

Es por ello que el presente estudio busca forjar nuevo conocimiento y metodología de aprovechamiento en el campo de reciclaje de plásticos en conformidad con las tendencias globales y las políticas estatales vigentes.

Las incógnitas que se pretende responder abarcan las condiciones adecuadas del proceso de extrusión para la obtención de una mezcla donde los productos obtenidos la misma sean de características óptimas y superiores a las de sus similares por separado.

Para ello la variable a manipularse en la investigación será el porcentaje de polietileno tereftalato reciclado a añadir al polipropileno reciclado, lo cual determinará las características del producto final, dicha medida abrirá la posibilidad de mejorar las propiedades de la mezcla. Además se busca determinar las variables que definen al proceso y así determinar sus requerimientos reales y el efecto que las mismas tendrán no solo en eficiencia del proceso, sino también las características finales del producto de extrusión, determinando de manera clara y concisa la estabilidad actual y potencial del sistema de estudio.

CAPITULO I.

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del problema.

El plástico es un material escasamente biodegradable, se estima que su descomposición tarda hasta 1000 años en dependencia al tipo que éste corresponda. Esta característica, que podría ser considerada una ventaja, representa un problema cuando termina su vida útil. El plástico generalmente es ligero y de bajo coste lo que favorece su fácil abandono, ésto a su vez conduce a consecuencias evidentes como su disposición por todo el planeta (Virginie 2011). Así los desechos plásticos en nuestro medio representan un grave problema ambiental debido a dos principales razones: su enorme cantidad y su disposición alrededor del mundo. Según un artículo publicado en el año 2018 por Science Magazine, se ha generado hasta el 2015 a nivel mundial una cantidad de 6300 toneladas de residuos plásticos aproximadamente, donde solo el 9% de los mismos han sido reciclados, el 12% incinerado y el 79% acumulado en vertederos o entornos naturales; de continuar esta producción y gestión de residuos, para el año 2050 habrá aproximadamente 12000 millones de toneladas de basura plástica en los vertederos o el medio ambiente.

En el Ecuador el consumo de plásticos crece a una escala vertiginosa, al igual que en todo el mundo. Según datos del AME-INEC. Registro de Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2017; a nivel nacional el 5,84% del total de los residuos representa a los plásticos rígidos y el 4,78% corresponde a plástico suave. En la provincia de Chimborazo el porcentaje de producción de desechos plásticos corresponde a valores de 8,07 % y 1,67 % de plástico rígido y plástico suave según corresponda, del total de residuos sólidos producidos dentro de la misma. Siendo la segunda provincia que mayor porcentaje de desechos plásticos rígidos produce, solo por debajo de la provincia de Esmeraldas la cual presenta un porcentaje de 9,18%. De igual forma se ubica en el tercer lugar de producción de desechos caracterizados como plástico suave después de las provincias de Orellana y Santo Domingo con valores de 10,59% y 8,90% según corresponda.

El manejo de estos residuos se ha convertido en un eje prioritario al momento de tratar los desechos sólidos. Dentro de las principales formas de disposición, el reciclaje representa ser la más

apropiada, si se toma en cuenta las consecuencias medioambientales que conllevan las otras soluciones definitivas.

En teoría el 90% del plástico se pueden reciclar, sin embargo debido a la dificultad de recolección y clasificación, en realidad el 75% de plásticos recogidos se reciclan. El sistema de recolección para el reciclaje de plásticos domésticos se aplica sobre todo a los plásticos de consumo de vida útil corta, como son los envases termoplásticos (PET, PP y PEAD). De los residuos plásticos más del 60% corresponde al PP (polipropileno) y PET (polietileno tereftalato) (Virginie 2015).

El polipropileno (PP), es el termoplástico de mayor uso además de ser el más ligero de los plásticos. Posee una alta resistencia a la dureza, tracción y rigidez debido a su la elevada cristalinidad que presenta. Presenta un alto punto de fusión lo que permite que el polímero no pierda su alta resistencia a la tracción cuando es sometido a altas temperaturas (Billmeyer 2004).

El polietileno tereftalato (PET) es un termoplástico, condición que le permite ser transformado mediante extrusión, inyección y otros procesos similares. Es extremadamente duro y posee un alto grado de cristalinidad, resistencia y tenacidad. Presenta un alto punto de fusión. Dichas características lo convierten en el mejor material para la elaboración de botellas y otros tipos de envases.

El reciclaje primario mecánico se realiza mediante la molienda y el calentamiento por extrusión de los residuos plásticos para su transformación en un material con propiedades físicas y químicas casi idénticas a las del original y tiene la ventaja de que puede repetirse una y otra vez. El material recuperado generalmente es utilizado en el área de la construcción (Virginie 2015).

La extrusión de polímeros es un proceso industrial mecánico, en el cual se realiza el moldeado del plástico, donde el material es alimentado por medio de una tolva en un extremo de la máquina y mediante un flujo continuo con presión y empuje, se mezcla en el cuerpo de la extrusora, obteniéndose por el otro lado mediante un perfil geométrico preestablecido (Fink 2013).

1.2 Línea Base del Proyecto

A nivel local, en la provincia de Chimborazo según datos del Registro de Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2017 se conoce que del total de residuos sólidos producidos dentro de ésta el 8,07 % corresponde a plástico rígido, siendo uno de los más representativos el polipropileno (PP), mientras que para plástico suave el valor es de 1,67 % donde el polietileno tereftalato (PET), es uno de sus representantes directos.

El presente proyecto busca reducir dichos valores, a través del reciclaje de estos materiales, en conformidad a la ya implantada iniciativa desde el presente año, donde se producen distintos artículos para el sector de la construcción cuya composición base es el polietileno.

De esta forma se contribuirá al esfuerzo para la reducción de estos desechos, además de la proporcionar una visión más amplia y de varias opciones para mejorar las características de los productos a obtener.

1.3 Beneficiarios directos e indirectos.

De acuerdo al proyecto se puede diferenciar tanto beneficiarios directos e indirectos, como sigue.

1.3.1 Beneficiarios Directos

Los beneficiarios directos del presente trabajo de titulación planteado son los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ya que les permite familiarizarse con el proceso de extrusión del polipropileno (PP), así como con el manejo de polietileno tereftalato (PET), y el posible estudio de este material obtenido para su aplicación industrial.

1.3.2 Beneficiarios Indirectos

El sector de la Construcción del país, al generar un material de mejores propiedades y características y que además proviene del reciclaje le permitirá a dicho sector tener una mayor participación en el manejo correcto de desechos sólidos producidos y la reducción de los mismos.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo General.*

Mejorar las propiedades físicas y mecánicas de Polipropileno (PP) Reciclado mediante la adición de Polietileno Tereftalato Reciclado (PET) por proceso de extrusión.

1.4.2 *Objetivos Específicos.*

- Realizar la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del polipropileno reciclado (PP) utilizado como materia prima.
- Determinar las variables del proceso de extrusión del polipropileno reciclado (PP) y del polietileno teraftalato reciclado (PET).
- Determinar la concentración óptima de polietileno teraftalato reciclado (PET) para su mezcla con polipropileno reciclado (PP).
- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del producto obtenido en base a la mezcla realizada.

1.5 Localización del proyecto.

El proyecto se llevó a cabo en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, Ecuador. En las instalaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Ciencias, en la Escuela de Ingeniería Química, ubicada en la Panamericana Sur km ½, en el laboratorio de Operaciones Unitarias con las coordenadas de longitud 78° 42' 20" oeste a una altitud de 2815 msnm.



Figura 1-1: Georreferenciación del laboratorio de Operaciones Unitarias. ESPOCH.

Fuente: Google Maps, 2019

Tabla 1-1.5: Coordenadas geográficas del área.

Provincia	Chimborazo
Cantón	Riobamba
Parroquia	Lizarzaburu
Coordenadas	1°39'29"S 78°40'35"O
Altitud	2815 msnm

Fuente: Google Maps, 2019

CAPITULO II.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Polipropileno (PP)

Es uno de los termoplásticos más usados debido a su bajo coste y alta disponibilidad. Billones de toneladas son consumidas anualmente en todo el mundo, lo cual se traduce en la generación de una gran cantidad de residuos.

El polipropileno es un plástico ligero cuya densidad es 0,905 y un elevado punto de fusión aproximadamente de 160 °C. Presenta alta resistencia a la tracción, rigidez y dureza. De excelentes propiedades eléctricas, carácter químico inerte y resistencia a la humedad propio de los polímeros de hidrocarburos. No presenta cuarteamiento por tensiones ambientales et. al 2016).

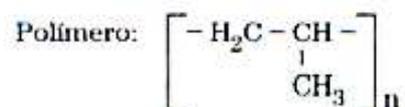
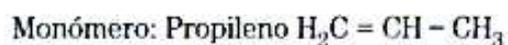


Figura 1-2: Estructura química de propileno y polipropileno.

Fuente: De la Llata, 2001.

Puede presentarse en tres formas estructurales isotáctica, sindiotáctica o atáctica, según la posición obtenida por el grupo metilo con respecto a la cadena. Según lo expuesto por Polo et al. 2016 :

Polipropileno isotáctica. Cada unidad de monómero se dispone de manera regular, con los grupos metilo dispuestos siempre al mismo lado de la cadena.

Polipropileno atáctica. Los grupos metilos se disponen de manera al azar a uno u otro lado de la cadena.

Polipropileno sindiotáctica. La posición de los metilos va cambiando a uno y otro lado de la cadena, de manera alternativa y regular (p. 14).

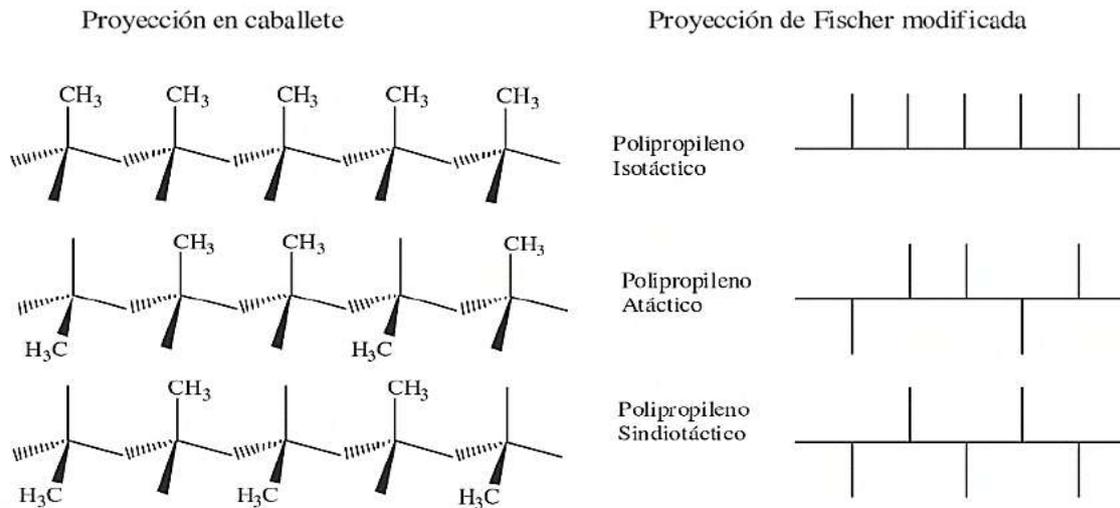


Figura 2-2: Formas estructurales del polipropileno.

Fuente: Polo et al. 2016.

La importancia de que un polímero sea atáctico, isotáctico o sindiotáctico recae en relación con sus propiedades. Para varias aplicaciones se requiere propiedades físicas que impliquen una buena cristalinidad del polímero, lo cual en el caso del polipropileno se traduce en elevados puntos de fusión aproximadamente de 170 °C; ésta solo es posible en estructuras regulares o también llamadas estereoregular (isotáctico y sindiotáctico) (Ege 2004).

Desde un enfoque comercial, el polipropileno isotáctico es el más importante, en comparación con los otros tipos, debido a la alta estereoregularidad de éste. El resultado es que muchas propiedades mecánicas y de procesabilidad del polipropileno están determinadas altamente por el nivel de isotacticidad y cristalinidad, como se menciona anteriormente.

El punto de fusión del polipropileno isotáctico y la temperatura de transición vítrea (entiéndase como un punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido del material), son más elevados que el del polietileno (Polo et al. 2016).

El isomero atáctico es un polímero amorfo (no cristalino), blando con un punto de fusión bajo de 75 °C.

Otro término utilizado es eutáctico, el cual describe a polímeros que pueden ser isotácticos como sindiotácticos, así como la mezcla de estos últimos (Seymour & Carraher 2002).

Tabla 1-2: Propiedades físicas del PP.

Propiedades	Unidades	Valor
Densidad	g/cm ³	0.91 – 0.94
Resistencia a la tensión	Psi	3200 - 5000
Absorción de agua, 24 hr	%	0.01
Elongación	%	3 – 700
Punto de Ablandamiento	°C	140 – 150
Punto de Fusión	°C	160 – 166
Volumen Específico	cm ³ /lb	30.4 – 30.8

Fuente: Maddah, 2016.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

2.2 Polietileno Tereftalato (PET)

Polímero lineal cuya estructura molecular le permite cristalizar, lo que es determinante para sus propiedades y aplicaciones. Éste presenta una excelente resistencia química y alta estanqueidad (calidad de impermeabilidad a los flujos fluidos, evitando de tal forma fugas de los elementos que pueden contener) (Polo et al. 2016).

Es el poliéster más conocido que se prepara a partir del etilenglicol y el ácido tereftálico (1).

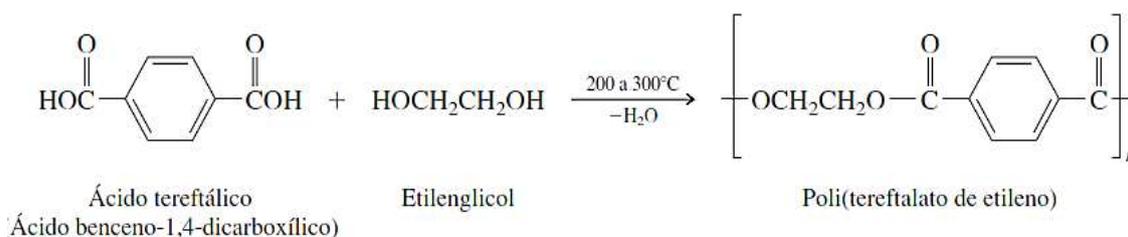


Figura 3-2: Reacción para obtención de polietileno tereftalato.

Fuente: Polo et al. 2016

El polietileno tereftalato (PET) es uno de los plásticos que más fácil se puede recuperar a partir de los residuos sólidos para ser reciclado y reutilizado como fibra de relleno, cintas de embalaje, geotextiles y otros. Este plástico ha seguido la tendencia de optimizar el envase utilizando una menor cantidad del material para cumplir su función (Ross et al. 2001).

Las características más importantes que el PET presenta son:

Tabla 2-2: Características importantes de PET.

Propiedades Mecánicas		
<i>Peso específico</i>	g/cm ³	139
<i>Resistencia a la tracción fluencia/ rotura</i>	kg/cm ²	900
<i>Resistencia a la flexión</i>	kg/cm ²	1450
<i>Alargamiento a la rotura</i>	%	15
<i>Módulo de elasticidad (tracción)</i>	kg/cm ²	37000
<i>Resistencia al desgaste por roce</i>	Muy buena	
Propiedades Térmicas		
<i>Temperatura de Fusión</i>	°C	255
<i>Conductividad Térmica</i>	Baja	
<i>Temperatura de deformidad al calor</i>	°C	170
Propiedades Eléctricas		
<i>Absorción de humedad</i>	%	0,25
Propiedades Químicas		
<i>Resistencia a álcalis débiles</i>	Buena	
<i>Temperatura Ambiente</i>		
<i>Resistencia a ácidos débiles</i>	Buena	
<i>Temperatura Ambiente</i>		
<i>Comportamiento a la combustión</i>	Arde con mediana dificultad	
<i>Propagación de llama</i>	Mantiene la llama	
<i>Comportamiento al quemado</i>	Gotea	

Fuente: Plásticos Mecanizables. IMC 2010.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

2.3 Compatibilizadores

El polietileno tereftalato (PET) y el polipropileno (PP) son termoplásticos incompatibles debido a las diferencias en la estructura química y la polaridad, el PP presenta una naturaleza apolar, mientras que el PET es una molécula polar (Inuwa et al. 2015).

Las mezclas con polímeros polares y no polares exhiben característicamente poca compatibilidad debido al alto grado de separación de fases, lo que da como resultado una procesabilidad de mayor dificultad. La miscibilidad de los diferentes polímeros se rige por la termodinámica y puede

modificarse mediante la incorporación de agentes compatibilizantes que disminuyen la tensión interfacial del sistema (Cardfelt 2015).

El problema de la poca miscibilidad de las mezclas polímero-polímero se aborda mediante la adición de agentes compatibilizantes con alta capacidad de interfase que reducen la energía interfacial. Con el aumento en el contenido de agente compatibilizador y, por lo tanto, la tensión interfacial disminuida, el grado de dispersión aumenta dando gotas más pequeñas de la fase dispersa. La compatibilización se puede lograr mediante la creación de enlaces entre los diferentes polímeros en la mezcla usando reacciones químicas in situ (Cardfelt 2015).

2.3.1 *Anhídrido Ftálico*

El anhídrido ftálico se usa ampliamente en todo el mundo para una gama extremadamente amplia de aplicaciones que abarcan desde la industria del plástico hasta la síntesis de resinas, fungicidas agrícolas y aminas. Tiene una importancia clave en la producción de plastificantes, poliésteres y resinas.

Un anhídrido contiene dos grupos carbonilo separados por un oxígeno, y un átomo de carbono está unido a cada carbono carbonílico. Actualmente su producción está basada en la oxidación en fase de vapor de o-xileno y naftaleno (Smith 2018).

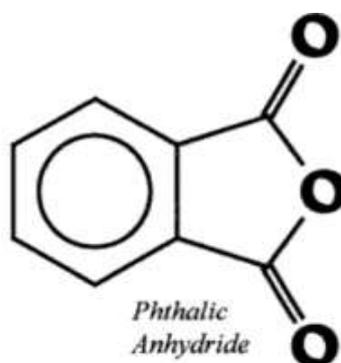


Figura 4-2: Estructura química del anhídrido ftálico.

Fuente: Smith, 2018.

En la figura 4-2 se observa la estructura química del anhídrido ftálico donde los grupos carbonilo se conjugan con el anillo de benceno. Presenta un punto de fusión de 131 °C.

2.4 Extrusión

En la extrusión, un material es forzado a través de una matriz que da forma al perfil. Del flujo continuo de material el resultado obtenido es una forma larga de sección transversal constante; los extruidos de plástico generalmente se acercan a una formación verdaderamente continua, logrando estabilidad dimensional de varias maneras (Ober et al. 2015).

La extrusora es esencialmente un transportador de tornillo que lleva gránulos de plástico fríos hacia adelante y los compacta en la sección de compresión con el calor de los calentadores externos y la fricción del flujo viscoso. La presión es más alta justo antes de que el plástico ingrese a la zona que da forma al extruido.

El análisis del flujo de polímero a lo largo del tornillo se divide en tres zonas correspondientes a las secciones detalladas en la figura 5-2 a continuación:

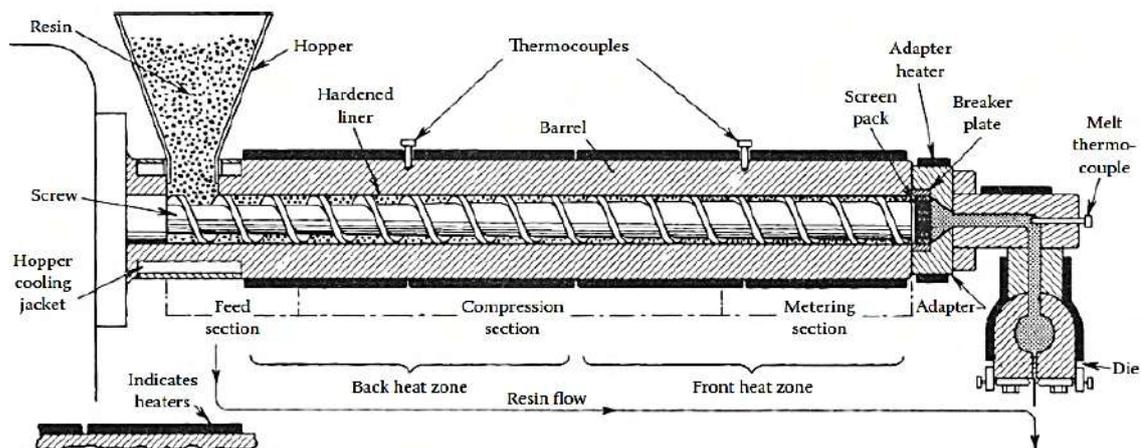


Figura 5-2: Sección transversal de una extrusora.

Fuente: Petrothene Polyolefins: A Processing Guide 1986.

Las zonas de las que se compone una extrusora son:

- **Zona de Alimentación.** Tolva donde se acumula la materia prima antes de su paso hacia el tornillo, se acepta el material sin fundir, iniciando la elevación de temperatura del material. En esta etapa se desprende el aire atrapado entre la materia prima y el que empieza a fundirse (Beltrán y Marcilla 2012)
- **Zona de Compresión o Transición.** En esta zona intermedia se funde el polímero debido acción mecánica combinado por medio del calentamiento del cilindro con la elevación de temperatura del mismo, en este proceso la transferencia de calor es lenta, puesto que el material sólido

poroso, ofrece un flujo de calor pobre. El arrastre y los esfuerzos de corte (cizalla), empujan el polímero hacia la boquilla, e implica un incremento en la presión (Beltrán & Marcilla 2012)

- Zona de Dosificación o Distribución. Situada al final, cerca de la boquilla, el material fundido que se comporta como un líquido viscoso es homogenizado y presurizado para poder forzarlo a través de la boquilla a presión (Morales 2010).
- Zona de la boquilla (cabezal). El diseño del cabezal determina la forma y diámetro de salida del fluido.

Los principales componentes de una extrusora son:

- Tolva. Contenedor donde se introduce la materia prima en la extrusora, para proporcionar el flujo constante de material se debe ensamblar perfectamente la tolva y garganta de alimentación (Beltrán & Marcilla 2012).
- Cilindro o barril. Principalmente está rodeado por resistencias eléctricas encargadas de proporcionar energía térmica para ser posible fundir el plástico.
- Tornillo o Husillo.

El cilindro y el tornillo de la extrusora son de aceros de alta resistencia y están protegidos contra el desgaste y la corrosión mediante una variedad de tratamientos de endurecimiento y revestimiento como nitruración y cromado duro. Así como soportar altas temperaturas y presiones elevadas (Kent 1998).

- Cabezal.
- Boquilla. Por medio de esta se obtiene el polímero fundido desde la parte frontal del tornillo para formar la forma básica del producto deseado (Kent 1998).

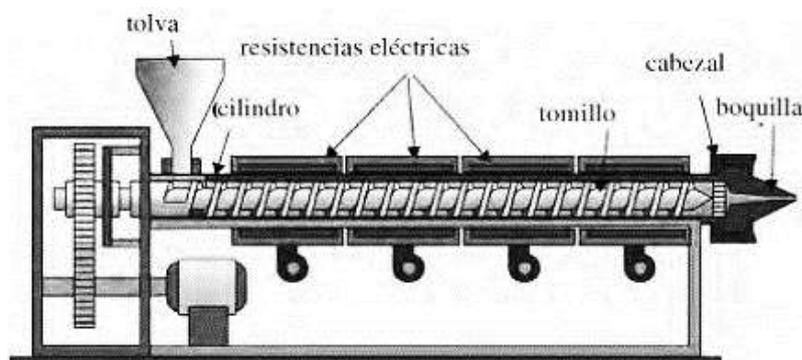


Figura 6-2: Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo.

Fuente: Beltrán & Marcilla 2012.

Existen diversas técnicas de extrusión dependiendo de las necesidades de uso, por tanto la variación se da en el diseño del cabezal. Dentro de las extrusoras más comunes tenemos:

- Extrusora sin husillo.
- Extrusora monohusillo o husillo simple.
- Extrusora con múltiples husillos.

2.5 Tipo de Estudio

El presente proyecto de tipo técnico presenta como base una línea de investigación exploratoria y experimental con la finalidad de obtener una adecuada metodología para el mejoramiento de las características físicas y mecánicas del polietileno reciclado.

Corresponde al tipo exploratorio puesto que la optimización del polipropileno reciclado mediante la adición de polietileno tereftalato no ha sido un tema de amplio estudio en el país, por lo cual no se ha explotado en su máxima extensión las características de este tipo de polímeros reciclados a nivel tanto de investigación como para su posterior explotación en el campo industrial.

Para poder mejorar las características del polipropileno reciclado se requiere de la manipulación de las variables implicadas en el proceso, desde el tratamiento previo de la materia prima, así como la correspondiente modificación con el acoplante y el posterior proceso de extrusión para obtener el producto final.

Es así que se necesita de un diseño experimental para la correcta obtención de una muestra representativa, seguida de una metodología estadística y cuantitativa para el análisis y control óptimo de los datos obtenidos.

2.6 Métodos

Este tipo de proyectos técnicos requieren de la utilización tanto de fundamentos teóricos como prácticos, ya que permite esto permiten la manipulación de las variables de proceso para llegar a los objetivos planteados. Los métodos a utilizar se presentan a continuación:

- **Método inductivo:** Este método consiste en obtener conclusiones generales partiendo desde premisas particulares planteadas.

Se estudia así la posibilidad de mejorar las características físicas y mecánicas del polipropileno

reciclado mediante la adición de polietileno tereftalato reciclado para obtener un producto que pueda tener una mayor gama de aplicaciones y mejores características que las materias iniciales presentan. Para ello se caracterizará la materia prima y analizará las diferentes alternativas de composición porcentual para realizar la mezcla, bajo dicha condición se llevará a cabo la parte experimental y finalmente, se procederá a la caracterización correspondiente del producto final obtenido.

- **Método deductivo:** Este método permite partir desde conceptos y conocimientos generales al objetivo final del proyecto, utilizando fundamentos de varias operaciones unitarias, química orgánica y cálculos básicos para un óptimo manejo de variables durante todo el proceso a llevar a cabo.
- **Método experimental:** Mediante un enfoque experimental se consigue manipular las variables de estudio como es el porcentaje de polietileno tereftalato reciclado (PET) para su correspondiente mezcla con polietileno reciclado, así como temperatura de extrusión, y porcentaje de acoplante utilizado; lo cual permite una observación de los efectos que las mismas tienen sobre el producto final obtenido. Las condiciones de trabajo se llevarán bajo un riguroso control con el fin de registrar algún comportamiento particular encontrado.

CAPITULO III.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Obtención de probetas

Para la obtención de las probetas a ensayar procedió como sigue:

3.1.1 *Proceso de Reciclaje*

Para este proyecto se llevó a cabo un reciclaje mecánico primario, el mismo puede ser aplicado a todo tipo de plásticos: termoplásticos, termoestables, plásticos contaminados e incluso materiales compuestos. Los plásticos muelen y funden junto con otros materiales según el objetivo final, posteriormente pasan a un extrusor. Este tipo de reciclaje permite la repetición infinita, muy ventajoso para el reciclaje (Virginie 2015).

El resultado del proceso fueron probetas las cuales cumplirán con características propias de los ensayos a someterlas.

3.1.2 *Obtención de las escamas de polipropileno reciclado (PP)*

El polipropileno se obtiene de desechos tales como tapas de botellas, recipientes, juguetes entre otros. Para su procesamiento es necesario diferenciar y clasificar este material lo más exacto posible.

La materia prima utilizada en el presente fue recolectada en los diferentes puntos de reciclaje de la ciudad de Riobamba, donde son clasificados y triturados según el tipo al que pertenezcan y el color que presentan, en este proceso no son retiradas etiquetas, pegantes o tintas del mismo.

El procedimiento para la obtención de las escamas de este material según lo expuesto por Al-Sabagh, 2016; se presenta a continuación.

Una vez tenemos los materiales de polipropileno estos pasan a un proceso de desintegración mecánica utilizando un cortador triturador industrial y se obtienen escamas de dicho polímero. Las escamas deben tener un diámetro de 1 – 2 cm, éstas pasan por una reclasificación donde se desechan residuos que no corresponden a la naturaleza requerida, tales como: madera, tela, papel, etc. Posteriormente las escamas pasan a un lavado de 20 a 30 minutos, con hidróxido de

sodio al 5% en peso por kilogramo de polipropileno, esto con el fin de eliminar elementos no correspondientes al fin buscado.

Finalmente se lleva a cabo un proceso de secado al ambiente por un periodo de 48 horas.

3.1.3 Obtención de las escamas de polietileno tereftalato reciclado (PET)

La principal fuente de polietileno tereftalato son las botellas plásticas utilizadas para embotellar agua, refrescos, jugos y demás. Se realizó una recolección de este material en puntos y basureros ecológicos hasta conseguir una cantidad considerable del mismo; se retiran las tapas, etiquetas.

Se procede a realizar un lavado con agua y detergente durante 20 a 30 minutos, de las botellas plásticas para eliminar el contenido de las mismas. Posteriormente se realiza el proceso de secado al ambiente por 48 horas. El material seco es triturado y se obtienen escamas las cuales deben tener un diámetro de entre 1 – 2 cm o menor.

3.1.4 Extrusión del polipropileno reciclado

La extrusión es un proceso mecánico, que busca fundir las escamas de polipropileno previamente obtenido, haciéndolo pasar desde la tolva de alimentación, hacia el tornillo de extrusión bajo parámetros como presión, temperatura, empuje y fricción que se genera gracias al tornillo sin fin o husillo. Esto generará una pasta o flujo pastoso continuo y constante el cual será moldeado al pasar por el cabezal del extrusor.

El polímero es básicamente fundido dentro del cilindro precalentado previamente. El punto de fusión del PP se encuentra en un rango de temperatura de 160-190° C. La máquina de extrusión debe ser precalentada previamente. La elaboración de estas probetas se realiza con el fin caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del material base (polipropileno reciclado), antes de la respectiva mezcla con polietileno tereftalato.

3.1.5 Extrusión de la mezcla de PP reciclado y PET reciclado

Según lo descrito por Li, Xie & Guo 2001, Cardfelt 2015 y Inuwa et al. 2015; donde se busca modificar la matriz de polipropileno mediante la adición de un compatibilizador, como sigue:

Las escamas de polietileno tereftalato (PET) reciclado, gránulos de polipropileno (PP) reciclado y los gránulos de agente compatibilizador en forma de gránulos o en polvo, se extrusionaron de

forma reactiva. Las formulaciones se mezclaron por fusión usando una extrusora monohusillo. El extrusor debe ser precalentado por mínimo 1 hora. El ajuste de temperatura desde la tolva hasta la matriz oscilan entre 135 – 265 °C. La velocidad del tornillo es de 350 rpm.

3.1.6 Moldeado por prensado

Las probetas de ensayo para materiales no metálicos se prepara por prensado mediante una prensa hidráulica a una presión máxima de 4500 PSI y enfriamiento al medio ambiente.

Para plásticos rígidos y semirrígidos se tienen 5 tipos de muestras de ensayo las cuales se realizan conforme a las dimensiones especificadas por normas, en la figura 8.3 se muestra el espécimen Tipo A, el cual es empleado generalmente cuando se requieren comparaciones directas entre materiales en diferentes casos de rigidez (es decir, no rígido y semirrígido) (NTE INEN 2043:2013).

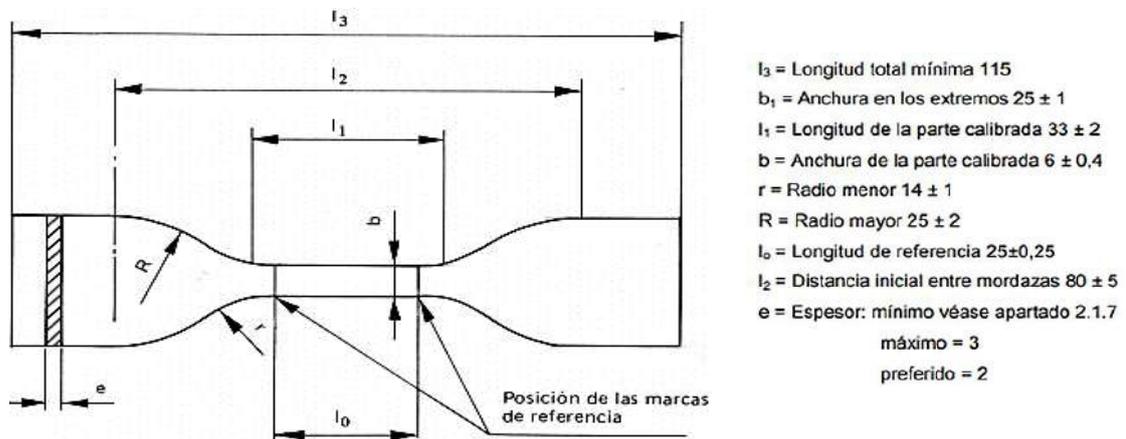


Figura 1-3: Probeta tipo A para ensayos de tracción en plásticos.

Fuente: NTE INEN 2043:2013 “Plásticos. Método De Ensayo para la Determinación de las Propiedades de Tensión”.

3.1.7 Caracterización de las probetas obtenidas

Para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas tanto de las probetas de polipropileno reciclado así como las probetas de la mezcla propuesta, se llevó a cabo los siguientes ensayos:

- Ensayo de Flexión.
- Ensayo de Tracción.
- Ensayo de Compresión.
- Ensayo de Dureza (Shore).

- Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).
- Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo (FTIR).

3.2 Técnicas

El proyecto se llevó a cabo mediante las siguientes técnicas descritas:

3.2.1 Reducción de tamaño

Tabla 1-3: Reducción de tamaño y tamizado

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
La reducción mecánica tiene como objetivo disminuir el tamaño de la muestra, mediante la utilización de molinos, trituradores y quebrantadores.	<ul style="list-style-type: none"> • Triturador de botellas plásticas (PET). • Botellas plásticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Encender el triturador. • Aplastar las botellas previamente a su carga. • Introducir las botellas dentro de la zona de carga del triturador, una a una. • Apagar y limpiar el equipo.

Fuente: Vian & Ocón, 1979.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

3.2.2 Extrusión de materiales

Tabla 2-3: Extrusión de materiales

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
El proceso de extrusión se una operación de transformación en la que un material fundido es forzado a pasar por una boquilla para producir un producto de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida.	<ul style="list-style-type: none"> • Extrusor de tornillo infinito o husillo • Polipropileno (PP) reciclado (escamas) • Polietileno tereftalato (PET) reciclado (escamas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Precalentar el extrusor por al menos 1 hora. • Programar el perfil de temperatura • Colocar el material en la tolva de alimentación. • Moldear la mezcla fundida. • Apagar el equipo.

Fuente: Ober et al. 2015.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

3.2.3 Ensayo de Flexión

Tabla 3-3: Ensayo de Flexión

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
<p>Con este método pueden determinarse: el esfuerzo de flexión, la flecha de rotura de los materiales y el módulo aparente de elasticidad en flexión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maquina Universal de Ensayos - WAW600B • Probetas de PP • Probetas PP - PET 	<ul style="list-style-type: none"> • Preparar barras rectangulares, según las especificaciones de la norma a ensayar. • Se mide el espesor y ancho de las muestras. • Entre apoyos ajustar su distancia • Se debe medir la distancia entre apoyos con una precisión de 0,5%. • Ajustar la distancia entre apoyos L a un valor que cumpla con la ecuación: $L=(16 \pm 1) \times \text{espesor medio}$. Para muestras normales L= 64 mm. • Método A. Determinar la curva esfuerzo en flexión/ deformación en flexión empleando la velocidad de ensayo. • Registrar la fuerza y flecha correspondiente de la muestra.

Fuente: NTE INEN 2047:2013. "Plásticos. Determinación de la Resistencia a la Flexión de los Materiales Plásticos Rígidos".

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

3.2.4 Ensayo de Tracción

Tabla 4-3: Ensayo de Tracción

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
<p>Las probetas son deformadas a lo largo de su eje mayor, con una velocidad constante y aplicando una fuerza determinada hasta que la probeta se rompa, hasta que la carga o el alargamiento presente cierto valor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maquina Universal de Ensayos - WAW600B. • Probetas de PP. • Probetas PP – PET. 	<ul style="list-style-type: none"> • A una precisión de 0,01 mm, medir ancho y espesor, proceder a calcular el valor medio de la sección recta. • Se determina la velocidad a realizar el ensayo. • Regular la velocidad al valor designado y conectar la máquina. • Colocar la probeta en la máquina de forma que su alineación sea axial. • De ser necesario, antes de aplicar el esfuerzo, ubicar y ajustar un extensómetro calibrado. • Ajustar un extensómetro calibrado sobre la longitud de referencia de la probeta (para mayor precisión en la lectura de los valores de respuesta). • Aplicar a la probeta una fuerza para proceder a deformarle. • Realizar la curva esfuerzo-alargamiento con los datos obtenidos.

Fuente: NTE INEN 2043:2013. “Plásticos. Método de Ensayo para la Determinación de las Propiedades de Tensión”.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

3.2.5 Ensayo de Compresión

Tabla 5-3: Ensayo de Compresión

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
La muestra se comprime a lo largo de su eje principal a una velocidad constante. Se utiliza para determinar la resistencia a la compresión, módulo de compresión, y otros aspectos de la relación tensión/deformación en compresión bajo las condiciones definidas.	<ul style="list-style-type: none"> • Maquina Universal de Ensayos - WAW600B. • Cilindros de PP. • Cilindros PP – PET. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los extremos de las muestras deben ser lisos, planos y paralelos. • La muestra se ubica entre placas de compresión paralelas a la superficie. • Se comprime a una velocidad uniforme. • La carga máxima se registra junto con los datos de tensión-deformación.

Fuente: NTE INEN-ISO 604. “Plásticos. Determinación de las Propiedades en Compresión”.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

3.2.6 Ensayo de Dureza

Tabla 6-3: Ensayo de Dureza (Shore)

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
Este método es empírico cuya finalidad es el control. Consiste en aplicar un penetrador específico al material de ensayo, bajo condiciones especificadas y se mide la profundidad de penetración, ésta es inversamente a la dureza de penetración	<ul style="list-style-type: none"> • Shore D Durometer 0-100HD • Probetas de PP. • Probetas PP – PET. 	<ul style="list-style-type: none"> • Colocar las muestras sobre una superficie plana. • Colocar el Durómetro Shore D sobre las muestras. • Presionar el equipo sobre los puntos seleccionados. • Tomar 3 medidas de cada una de las muestras. • Registrar las medidas

Fuente: NTE INEN-ISO 868. “Plásticos y Ebonita. Determinación de la Dureza de Indentación por medio de un Durómetro (Dureza Shore)”.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019

3.2.7 Microscopia Electrónica de Barrido

Tabla 7-3: Microscopia Electrónica de Barrido

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
<p>Scanning Electron Microscope (SEM). La microscopía de barrido electrónico es una técnica cuyo objetivo es la obtención de imágenes de alta resolución, que permite analizar características morfológicas, estructurales cristalinidad, porosidad y composición química.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Microscopio electrónico de barrido • Muestras de 5 x 5 mm de PP. • Muestras de 5 x 5 mm de PP – PET. 	<ul style="list-style-type: none"> • Etiquetar las muestras correctamente para su identificación. • Encender el equipo. • Crear una conexión al suelo con cinta metálica y visualizar su muestra en el área cercana. • Operar a un menor nivel de vacío. • Observar las muestras al microscopio. • Tomar fotografías de las muestras observadas. • Analizar las imágenes de estructura morfológica obtenidas. • Realizar un análisis de la composición porcentual elemental de la estructura estudiada. • Apagar el equipo luego de liberar la presión de vacío.

Fuente: Clavijo 2013.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

3.2.8 Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo (FTIR).

Tabla 8-3: Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo (FTIR).

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
FTIR (Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo) es una técnica que se utiliza para obtener un espectro infrarrojo de absorción, emisión, fotoconductividad. En la interfaz es posible leer longitudes de onda en las que vibran los diferentes grupos funcionales.	<ul style="list-style-type: none">• Perkin - Elmer 100 FTIR Spectrum.• Virutas de PP reciclado (materia prima).	<ul style="list-style-type: none">• Encender el equipo.• Asignar cuantitativa bandas en los espectros.• Calibrar las frecuencias del equipo.• Colocar la muestra en el soporte del equipo y registrar el espectro a la más alta y posible resolución.• Reconocer las bandas del espectro obtenido.• Apagar el equipo.

Fuente: Yin 2017.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019

3.3 Variables de Proceso

Las variables de proceso establecen las condiciones de trabajo en el momento de la extrusión, así como son determinantes para las características y propiedades finales del producto obtenido.

3.3.1 Perfil de Temperatura

El perfil de temperatura se definió en base a los puntos de fusión del polipropileno, polietileno tereftalato y el compatibilizador, en este caso el anhídrido ftálico. Así como revisión bibliográfica de estudios previos realizados.

Las características del equipo exigen la configuración de 4 temperaturas pertenecientes a cada una de las zonas del mismo. Se propusieron tres perfiles de temperatura dentro de los cuales se llevó a cabo la extrusión de la mezcla propuesta; mientras que para la obtención de las probetas base, es decir solo PP reciclado se utilizó un único perfil de temperatura propio del material.

La elección de dichas temperaturas de extrusión se realizó en base a lo expuesto por Nonato y Bonse 2016, donde se expone valores de temperatura para polipropileno reciclado son de 175 °C en la zona 1, 180 °C en las zonas 2, 3 y 4, 190 °C en la zona 5 y 185 °C en la zona 6, de acuerdo al equipo utilizado.

Así también se tomaron en cuenta estudios de Pang, et al. (2000), donde el tornillo de la extrusora presentaba 8 zonas de control de temperatura (desde la zona de alimentación hasta la boquilla) 160,190, 200, 210, 220, 220, 210 y 200 °C y Cardfelt (2015), donde el perfil de temperatura desde la tolva hasta la boquilla oscilan entre 165 y 240 °C. Demás autores coinciden con lo realizado por Potiyaraj, Tanpichai, & Phanwiroj (2012), donde los valores de las zonas 1 – 4 son de 200 °C.

Tabla 9-3: Perfiles de temperatura configurados.

Temperaturas por zona				
	<i>Alimentación</i>	<i>Compresión</i>	<i>Dosificación</i>	<i>Boquilla</i>
<i>A</i>	140	175	175	175
<i>B</i>	155	190	190	190
<i>C</i>	170	205	205	205

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Un factor a tomar en cuenta también son las rpm (revoluciones por minuto) a las cuales el material extrudido fluiría dentro del equipo, en base a la experiencia de trabajo en éste se determinó que el flujo adecuado de trabajo se logra en el valor de 350 rpm (Zdrazilova et al. 2004).

3.3.2 Porcentaje de PET reciclado añadido a la matriz de PP reciclado.

Se trabajó con cuatro porcentajes distintos de PET añadidos a la matriz de PP, estos fueron elegidos en base a lo expuesto por Inuwa et al. (2015), donde se modifica la matriz del 70% de PP con un 30% de PET, lo que coincide con el estudio realizado por Cardfelt (2015). Autores como Zdrazilova et al. (2004) y Teixeira, et al. (2008); exponen como porcentaje máximo de PET 50% y con un valor mínimo del 5%.

3.3.3 Porcentaje de compatibilizador (anhídrido ftálico).

Como se dijo polipropileno y polietileno tereftalato son inmiscibles es por ello que dentro del proceso de extrusión se añade anhídrido ftálico como compatibilizador, según lo descrito por Saujanya & Radhakrishnan (2001) la matriz se modifica con porcentajes de 5, 10, 15% de

compatibilizar, Jaziri et al. (2016) en una base del 85% de PP varia el porcentaje de acoplante entre porcentaje de 5, 3.75, 2.75 y 1.25 % en peso.

Bajo esta premisa los porcentajes a trabajar en las mezclas es de 1, 3 y 5 % de anhídrido ftálico en polvo dentro de cada mezcla como acoplante o compatibilizador.

De acuerdo a los valores de las variables elegidas se procedió a realizar el diseño experimental, como sigue:

Tabla 10-3: Diseño Experimental I

Temperatura	Nomenclatura	% PET	% PP
A	1	5	95
	2	10	90
	3	20	80
	4	30	70
B	1	5	95
	2	10	90
	3	20	80
	4	30	70
C	1	5	95
	2	10	90
	3	20	80
	4	30	70

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Nota: Los valores de A, B, C, corresponden a los perfiles de temperatura expuestos en la Tabla 9-3.

En base a los resultados de los ensayos físicos y mecánicos realizados a las probetas obtenidas según los lineamientos de la Tabla 11-3, se procedió a obtener las probetas cuya matriz fue modificada mediante la adición de compatibilizador (anhídrido ftálico) como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11-3: Diseño Experimental II

Temperatura	% PET	% PP	% Anhídrido Ftálico
			1
T*	% PET *	% PP *	2
			3

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Nota: T*, PET*, PP* son elegidos bajo las condiciones expuestas.

3.4 Cálculos de Ingeniería

3.4.1 Flujo Volumétrico

Volumen de líquido viscoso que atraviesa una sección transversal (cilindro), por unidad de tiempo.

Tabla 12-3: Variables de diseño del extrusor monohusillo.

Variable	Unidades	Valor
α	cm ³	1,956
k	cm ³	3,835
β	cm ³	2,447 x 10 ⁻⁶
n	rpm	75,24
γ	cm ³	1,888 x 10 ⁻⁷
Q	cm ³ / min	---

Fuente: Tubón & Carillo, 2014.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Nota: Los valores de cada una de las variables fueron tomados del diseño propio del equipo.

Donde:

α = Flujo de arrastre.

k = Constante total de la forma geométrica (cabeza perfiladora).

β = Flujo de presión.

n = Revoluciones del husillo.

γ = Flujo de filtración.

Q = Flujo Volumétrico.

$$Q = \frac{\alpha * k}{k + \beta + \gamma} n \quad \text{Ec. 1 - 3}$$

$$Q = \frac{1,956 * 3,835}{3,835 + 2,447 \times 10^{-6} + 1,888 \times 10^{-7}} * 75,24$$

$$Q = 147,17 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

El flujo volumétrico del equipo es de 147,17cm³/min.

3.4.2 Balance de masa

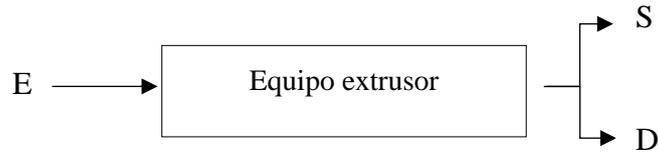


Tabla 13-3: Datos experimentales del proceso de extrusión.

Variable	Unidades	Valor
<i>E</i>	kg	1,5
<i>S</i>	---	21
<i>D</i>	kg	---

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Nota: La masa de cada probeta obtenida es de 30 gramos.

Donde:

E = Materia prima alimentada.

S = Número de probetas obtenidas.

D = Desperdicio extruido.

$$E = S + D \quad \text{Ec. 2 - 3}$$

$$D = E - S$$

$$D = 1,5 \text{ kg} - 21(0,03 \text{ kg})$$

$$D = 1,5 \text{ kg} - 0,63$$

$$D = 0,87 \text{ kg}$$

El desperdicio extruido por cada carga de 1,5 kg de materia prima es de 0,87 kg.

3.4.3 Rendimiento del proceso

$$\text{Rendimiento} = \frac{21 \times 0,03}{E} * 100\% \quad \text{Ec. 3 - 3}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{0,63}{1,5} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento} = 42 \%$$

El rendimiento del proceso de extrusión es del 42%.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico descriptivo para determinar la homogeneidad de los datos y por tanto validar la confiabilidad de la metodología aplicada para la obtención de las probetas. Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis, método no paramétrico utilizado para el análisis de varianza en este marco.

La prueba se corrió para cada una de las dimensiones especificadas en la tabla 1-4 y para todas las pruebas según las variables especificadas.

4.1 Caracterización de la materia prima

Se determinaron las características determinantes para la identificación precisa de la materia prima, es decir las propiedades físicas, mecánicas y estructurales.

Para la caracterización de la materia prima se realizó la extrusión del polipropileno reciclado y se procedió a obtener las probetas necesarias para las pruebas mecánicas y físicas del mismo.

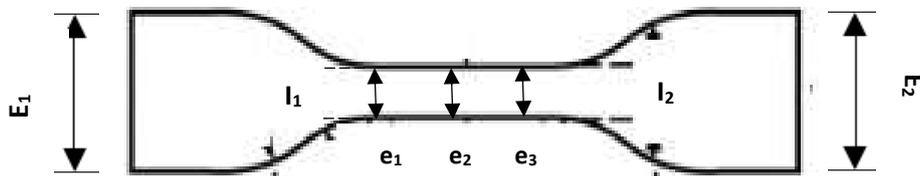


Figura 1-4: Representación dimensional de la probeta tipo A.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Donde:

e_1, e_2, e_3 = Espesores de la zona de ensayo (mm).

E_1, E_2 = Anchura (mm).

l_1, l_2 = Anchura de la zona de ensayo (mm).

m = Masa (g)

En la Tabla 1-4 se muestran las dimensiones de cada una de las probetas en base a los aspectos descritos en la figura 1-4.

Tabla 1-4: Dimensiones de las probetas PP reciclado.

<i>Dimensiones de las probetas</i>								
<i>Identificación</i>	e_1	e_2	e_3	E_1	E_2	l_1	l_2	m
P_1	3,8	3,8	3,8	4,2	3,9	6,0	6,1	30
P_2	4,3	4,3	4,2	4,3	3,9	5,9	6,0	30
P_3	3,5	3,5	3,5	3,9	2,9	6,2	6,2	30
P_4	4,1	4,1	4,0	4,3	4,2	5,8	6,1	30
P_5	3,7	3,7	3,7	4,2	4,2	5,6	6,2	30
P_6	3,8	3,7	3,8	4,1	3,3	6,4	5,8	30
P_7	4,1	4	4,1	4,7	4,3	5,9	6,1	30
P_8	4,2	4,2	4,2	3,9	3,2	6,0	5,8	30
P_9	4,2	4,2	4,2	4,2	3,8	6,1	6,2	30
P_{10}	4,2	4,2	4,1	3,7	3,7	6,2	6,0	30

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

La tabla 13-3 muestra el análisis estadístico llevado a cabo en cada una de las variables con el fin de determinar la varianza de la muestra.

Tabla 2-4: Análisis estadístico de las dimensiones de las probetas PP.

<i>PP e1</i>		<i>PP e2</i>		<i>PP e3</i>	
<i>Media</i>	3,99	<i>Media</i>	3,97	<i>Media</i>	3,96
<i>Error típico</i>	0,08492	<i>Error típico</i>	0,08699	<i>Error típico</i>	0,07775
<i>Mediana</i>	4,1	<i>Mediana</i>	4,05	<i>Mediana</i>	4,05
<i>Moda</i>	4,2	<i>Moda</i>	4,2	<i>Moda</i>	4,2
<i>Desviación estándar</i>	0,26854	<i>Desviación estándar</i>	0,27508	<i>Desviación estándar</i>	0,24585
<i>Varianza de la muestra</i>	0,07211	<i>Varianza de la muestra</i>	0,07567	<i>Varianza de la muestra</i>	0,06044
<i>Coefficiente de asimetría</i>	-0,68511	<i>Coefficiente de asimetría</i>	-0,49005	<i>Coefficiente de asimetría</i>	-0,71106
<i>Rango</i>	0,8	<i>Rango</i>	0,8	<i>Rango</i>	0,7
<i>Mínimo</i>	3,5	<i>Mínimo</i>	3,5	<i>Mínimo</i>	3,5
<i>Máximo</i>	4,3	<i>Máximo</i>	4,3	<i>Máximo</i>	4,2

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

4.1.1 Espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR).

Esta técnica permite reconocer los grupos funcionales que conforman una muestra según las longitudes de onda en las que estos vibran, como se muestran en la figura 10.3 donde la banda isotáctica de polipropileno puro vibra en $1211,30\text{ cm}^{-1}$, en los estudios realizados por Luna et al., 2015.

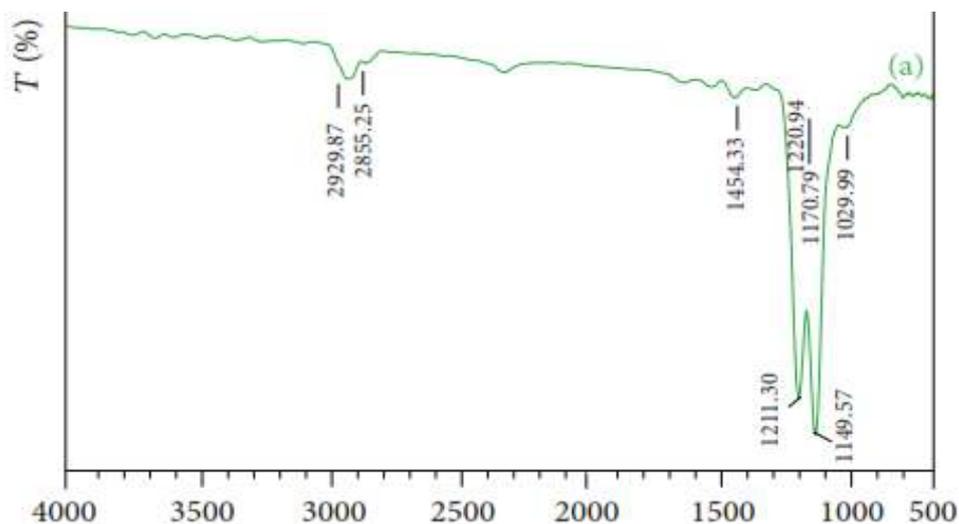


Figura 2-4: FTIR polipropileno puro.

Fuente: Talarico, Rosa, & Auriemma (2019).

De igual forma según Talarico et al. (2019), para iPP (polipropileno isotáctico), las bandas de regularidad se encuentran por debajo de 1400 cm^{-1} y están conectadas a diferentes valores del número, que describe el número mínimo de monómeros unidos en una secuencia isotáctica que define una estructura helicoidal. Las bandas espectrales IR a 1168 , 998 , 973 y 841 cm^{-1} están relacionadas con la formación de hélices isotácticas regulares.

En la figura 3-4 se muestra el IR obtenido del polipropileno reciclado usado como materia prima para el presente proyecto, donde la banda $1465,63\text{ cm}^{-1}$ representa la banda isotáctica puesto que desde el punto de vista del estudio de la isotacticidad del polipropileno, el rango entre 700 y 1500 cm^{-1} es el de mayor interés, esto en conformidad lo expuesto por Kotschkina & Industry, 1998.

De esta forma se determina que el material utilizado por materia prima es polipropileno de tipo isotáctico.

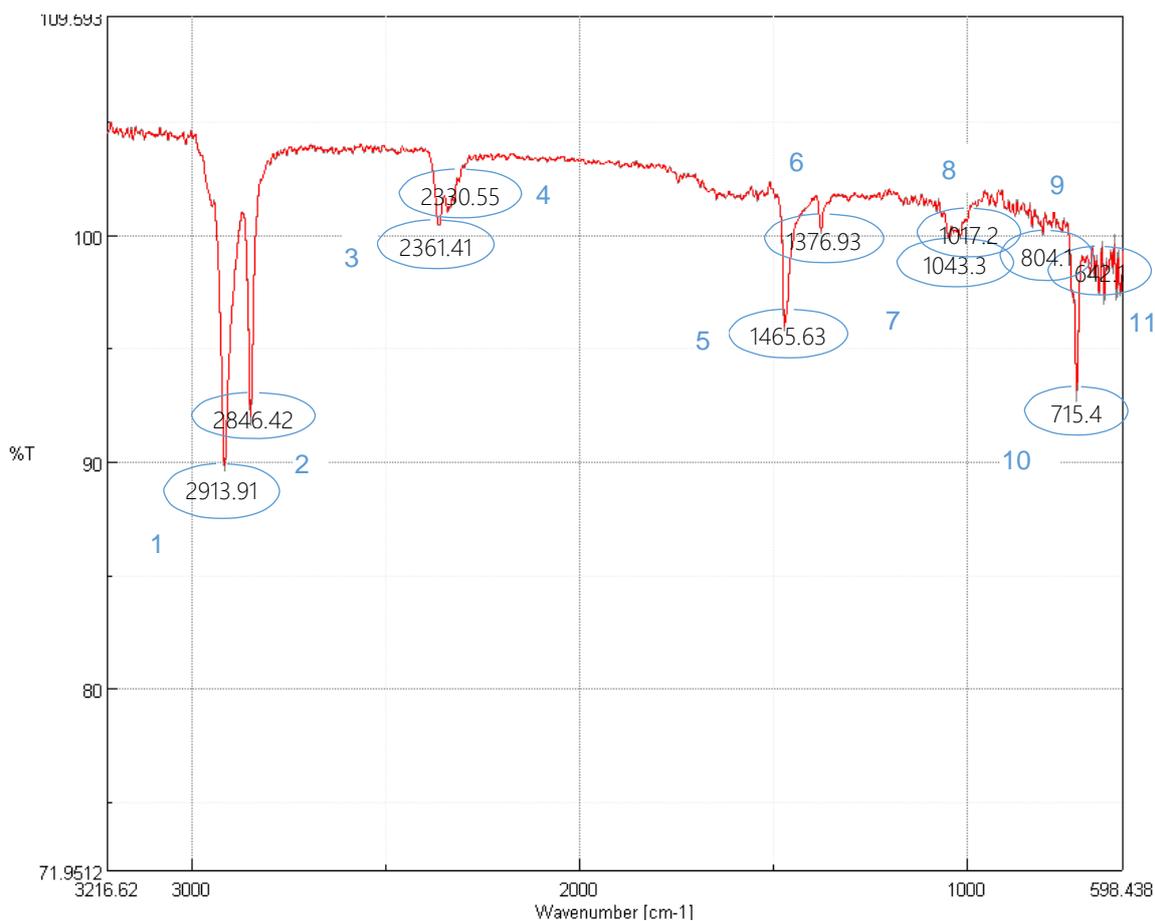


Figura 3-4: FTIR polipropileno reciclado.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

En la Tabla 3-4 se puede observar a detalle los grupos funcionales según el IR realizado. La banda en 2913,91 pertenece a la banda asimétrica y la banda 2846,42 a la vibración de deformación simétrica del grupo metilo. Las bandas 2361,41; 2330,55; 1043,3; 1017,2 y 804,1 son las bandas cristalinas.

Tabla 3-4: FTIR polipropileno reciclado.

<i>Longitud de Onda (cm⁻¹)</i>	<i>Grupo funcional</i>
2913,91 (moderado)	CH ₂
2846,42 (débil)	CH ₂
1454,33 (moderado)	Banda Isotáctica
1376,93 (fuerte)	CH ₃
1043,3 (fuerte)	Vibración de - CH ₃ & - CH ₂

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

4.1.2 Ensayo de Flexión.

Este tipo de ensayo sirve para evaluar la resistencia a la flexión así como el comportamiento esfuerzo-deformación, por tanto se estudia la resistencia a la flexión del material.

El tipo de polipropileno con que se trabajó en el presente es de tipo reciclado, es decir que sus propiedades no serán las mismas que la del material en estado puro, existirá un porcentaje de disminución de las mismas tal como lo comprueba Hyie, et al. (2019), donde se demuestra que existe una disminución en el límite elástico a la flexión por encima del 11,52%, esto debido al sometimiento a varios procesos físicos y químicos bajo los cuales se ha visto forzado el material reciclado; en tanto el módulo de flexión se deja caer al 8,79% en comparación con el PP virgen. Lo cual da como resultado que el material sea más frágil y menos procesable.

En la tabla 4-4 se expone los resultados ante el ensayo de flexión donde es el valor del esfuerzo en la rotura la medida representativa de estudio, en el caso del PP reciclado usado como materia prima es de 28,65 MPa valor máximo al cual el material cede al esfuerzo. Mientras que el módulo aparente de elasticidad es de 1149,49 Mpa. Estos valores son la base del estudio.

Tabla 4-4: Informe de Resultados. Ensayo de Flexión PP.

TIPO DE MATERIAL: Polipropileno Reciclado		
NORMA NTE INEN 2047:2013		
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>PP</i>
<i>Espesor</i>	mm	4,1
<i>Anchura</i>	mm	23,5
<i>Sección Transversal</i>	mm ²	96,35
<i>Módulo Aparente de Elasticidad</i>	MPa	1149,45
<i>Carga de Rotura</i>	N	75,46
<i>Esfuerzo en la Rotura</i>	MPa	28,65
<i>Flecha en la Rotura</i>	mm	20,43

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV.

4.1.3 Ensayo de Tracción

Este tipo de ensayo permite determinar cuánto le es posible a un material resistir los esfuerzos a los que puede estar sometido. La prueba de tracción es considerada como fundamental ya que ésta da un espectro general de las características mecánicas del material.

Según lo expuesto por Hyie et al. (2019) el polipropileno virgen tiene un valor del módulo de Young (módulo de elasticidad) mayor a la matriz de PP reciclado utilizado en el estudio en un 3,53%. Demostrando que el PP reciclado tiene más rigidez y un porcentaje de elongación menor esto debido a que se lo somete al reprocesamiento térmico en la extrusión, generando reordenamiento de estructuras que pueden reflejarse en un mayor porcentaje cristalinidad.

Tabla 5-4: Informe de Resultados. Ensayo de Tracción PP.

TIPO DE MATERIAL: Polipropileno Reciclado		
NORMA NTE INEN 2043:2013		
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>PP</i>
<i>Espesor</i>	mm	4,20
<i>Anchura</i>	mm	5,80
<i>Sección Transversal</i>	mm ²	24,36
<i>Módulo de Elasticidad</i>	MPa	1,708 x 10 ³
<i>Carga de Fluencia</i>	N	387,32
<i>Esfuerzo de Fluencia</i>	MPa	15,90
<i>Carga Máxima</i>	N	450,28
<i>Esfuerzo Máximo</i>	mm	18,48
<i>Porcentaje de elongación</i>	%	3,80

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV

En el grafico 1-4, se muestra el valor de alargamiento de 0,081 (deformación unitaria) del polipropileno reciclado. Dando un punto de fluencia a un valor de 15,90 MPa y 0,02, mientras que el valor de 18,48 MPa representa al esfuerzo máximo donde la probeta alcanza el límite máximo antes de la ruptura permanente.

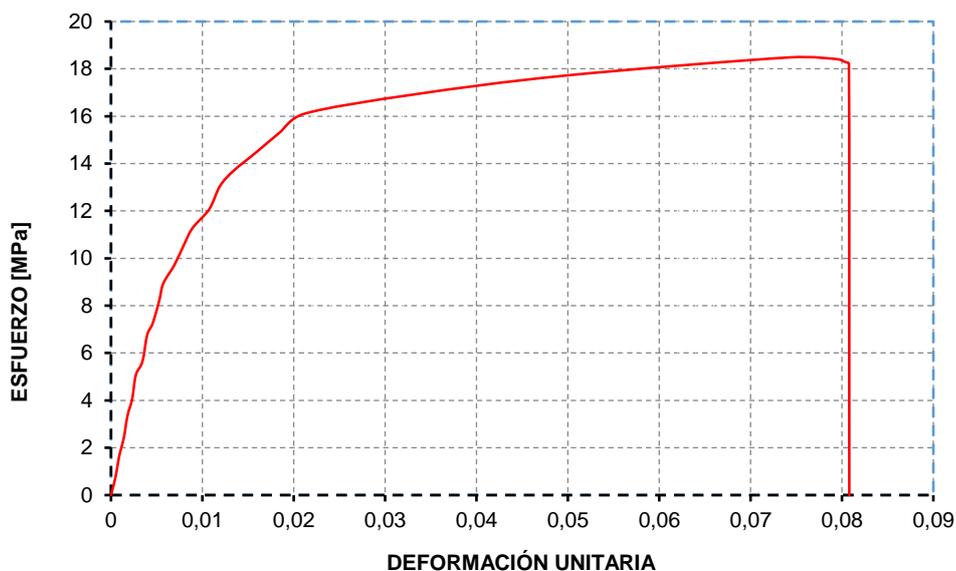


Gráfico 1-4: Curva Esfuerzo vs. Deformación unitaria de PP reciclado.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

4.1.4 Ensayo de Compresión.

El modulo aparente de elasticidad nos permite conocer el comportamiento del material a lo largo del sometimiento al esfuerzo, en este caso es de 141,27 MPa para el polipropileno reciclado usado como materia prima. La carga máxima es el valor que nos permite reconocer el límite al cual el material cederá y sufrirá ruptura al esfuerzo, siendo de 12480 N este será el valor a mejorar.

Tabla 6-4: Informe de Resultados. Ensayo de Compresión PP.

TIPO DE MATERIAL: Polipropileno Reciclado		
NORMA NTE INEN-ISO 604		
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>PP</i>
<i>Diámetro</i>	mm	26
<i>Sección Transversal</i>	mm ²	530,90
<i>Módulo Aparente de Elasticidad</i>	MPa	141,27
<i>Carga Máxima</i>	N	12480
<i>Esfuerzo Máximo</i>	MPa	18,48

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV

4.1.5 Ensayo de Dureza.

Se utilizó el método Shore D, donde se aplicó una carga de 0,55 N; la punta de acero tiene la forma de un cono truncado y coeficiente de rigidez de 4 N/mm.

Tabla 7-4: Informe de Resultados. Ensayo de Dureza PP.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP					
NORMA NTE INEN-ISO 868					
	<i>Unidad</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Promedio</i>
PP	Dureza Shore	60,5	65,5	61,5	62,50

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

El módulo de Dureza Shore registrado para la materia prima es de 62,5 como se muestra en la tabla 7-4. Para polipropileno puro el rango de dicho modulo presenta valores de 95, 90, 90 en la escala de Dureza de Rockwell – R (Maddah 2016), éstos presentan una equivalencia bajo la Dureza Shore D 75, 70, 70 respectivamente. Como se mencionó los módulos son más bajos en comparación del PP puro como reciclado esto debido a la naturaleza propia del material.

4.1.6 Microscopia Electrónica de Barrido

Las micrografías SEM de PP reciclado se muestran en la Figura 4-4.

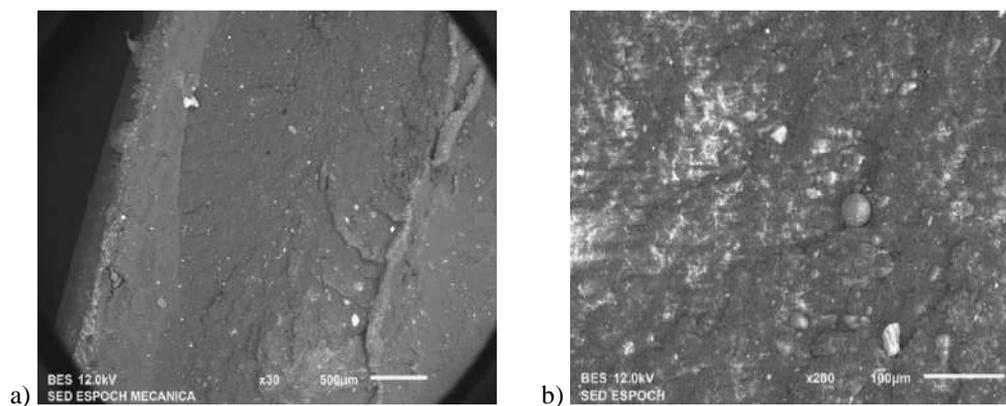


Figura 4-4: SEM polipropileno reciclado.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

Nota: a) SEM imagen de PP reciclado (fractura por tracción). b) SEM imagen de estructura morfológica de PP reciclado.

En ésta es posible observar un sistema homogéneo de una sola fase, esta fase continua será la que actúa como matriz más adelante. Para determinar qué material era la matriz, y se encontró un 100

% de átomos de carbono corroborando la imperceptible existencia de otros componentes posibles debido a la presencia de colorantes y otros aditivos.

La Figura 4-4a muestra la fractura bajo tracción de la materia prima, presentando una ruptura uniforme con nulas estrías en la superficie, es posible identificarla como fractura frágil la cual tiene lugar sin una apreciable deformación ya que la grieta se propaga con rapidez. En 4-4b se observa la estructura morfológica de PP reciclado, mostrando una superficie lisa de conglomerado homogéneo.

4.2 Caracterización de probetas mezcla PP/PET.

4.2.1 Apariencia del material extruido.

De acuerdo con la tabla 9-3 se realizó el experimento bajo 3 perfiles de temperatura distintos, se realizó un análisis de la apariencia del material extruido para determinar visualmente el comportamiento del material ante los perfiles seleccionados.

Tabla 8-4: Apariencia del material extruido

ANÁLISIS DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA									
Perfil	%PP - PET	Grado de fundición PET			Apariencia	Procesabilidad			Observaciones
		Malo	Bueno	Excelente		Malo	Bueno	Excelente	
A	1	x			Viscoso	x			Parcial presencia de escamas PET sin fundir
	2	x			Viscoso	x			Parcial presencia de escamas PET sin fundir
	3	x			Totalmente viscoso	x			Alta presencia de escamas PET sin fundir
	4	x			Totalmente viscoso	x			Alta presencia de escamas PET sin fundir
B	1			x	Forma Ideal			x	Sin presencia de escamas PET sin fundir
	2			x	Forma Ideal			x	Sin presencia de escamas PET sin fundir
	3		x		Poco viscoso		x		Nula presencia de escamas PET sin fundir
	4		x		Poco viscoso		x		Nula presencia de escamas PET sin fundir
C	1			x	Forma Ideal			x	Totalmente fundido
	2			x	Forma Ideal			x	Totalmente fundido
	3			x	Forma Ideal			x	Totalmente fundido
	4			x	Forma Ideal			x	Totalmente fundido

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

Como se puede observar el material extruido bajo las condiciones de temperatura del perfil A, cuyos valores son de 175 – 175 – 175 – 150, éste presenta una apariencia poco deseable del material, de igual forma las escamas de PET reciclado añadidas a la matriz de PP reciclado no se fundieron obteniendo un fluido totalmente viscoso, esto se debe a que la temperatura de fundición del PET es mucho más alta a la propuesta en el presente perfil, bajo estas condiciones las probetas obtenidas no cumplen con el objetivo planteado ya que el PET reciclado no se combina con la matriz de PP reciclado, además dicho fluido es poco manejable u operable. Por tanto el perfil de temperatura A es descartado ante las condiciones descritas y los ensayos mecánicos serán realizados a las probetas correspondientes a los perfiles de temperatura B y C, como sigue.

4.2.2 Ensayo de Flexión.

En la tabla 9-4 se muestran los resultados del ensayo de flexión llevados a cabo sobre las probetas extruidas bajo los perfiles de temperatura identificados como B y C y sus correspondientes porcentajes de PET reciclado ante la matriz de PP reciclado, dentro de este estudio los valores que muestran las propiedades mecánicas del material son los identificados como *módulo de elasticidad* y *esfuerzo a la rotura* dentro de los cuales se observa una inminente diferencia de acuerdo a las variables bajo las cuales se trabajaron.

Tabla 9-4: Informe de Resultados. Ensayo de Flexión PP/PET.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET									
NORMA NTE INEN 2047:2013									
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
<i>Espesor</i>	mm	4,10	4,30	4,50	4,00	4,20	3,50	4,00	4,00
<i>Anchura</i>	mm	22,70	23,60	22,90	22,60	23,2	23,50	22,60	22,50
<i>Sección Transversal</i>	mm ²	93,07	101,48	103,05	90,40	97,44	82,25	90,40	90,00
<i>Módulo de Elasticidad</i>	MPa	1708,46	1708,46	1708,46	1708,46	841,92	898,93	2372,35	1323,01
<i>Carga de Rotura</i>	N	76,44	75,52	96,04	81,34	71,54	48,02	64,68	62,72
<i>Esfuerzo en la Rotura</i>	MPa	30,05	24,93	31,07	33,74	26,22	25,02	26,83	26,13
<i>Flecha en la rotura</i>	mm	24,56	16,91	19,31	17,96	21,49	5,26	16,37	16,67

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV.

Nota: Nomenclatura 1, 2, 3, 4 corresponden a las mezclas PP/PET-5%, PP/PET-10%, PP/PET-20%, PP/PET-30%. Véase tabla 9-3.

Para fines explicativos se procedió a un análisis más enfocado hacia las características determinantes mediante la utilización de gráficos de barra.

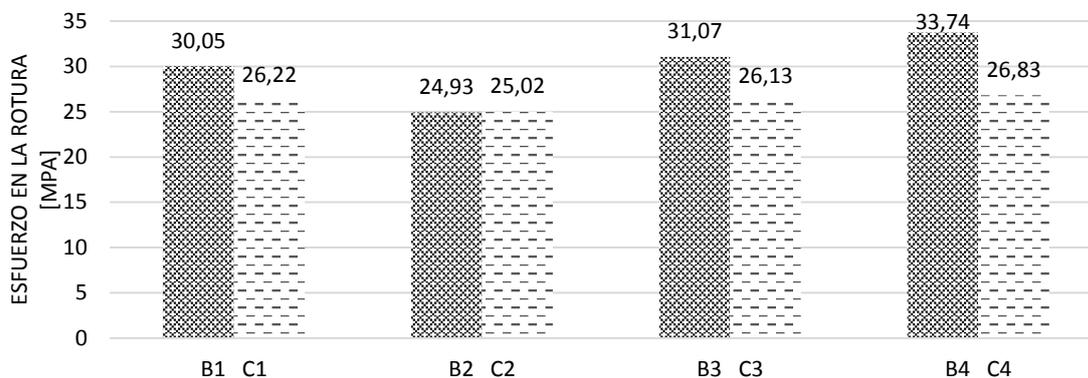


Gráfico 2-4: Esfuerzo en la rotura [MPa] - % PP/PET.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

En la gráfico 2-4 se analizan los valores de esfuerzo en la rotura [Mpa] donde se puede observar una tendencia dentro de cada perfil de temperatura, de tal forma los valores de esfuerzo en la rotura son directamente proporcionales al porcentaje de PET reciclado añadido a la matriz de PP reciclado, lo cual va de la mano en lo descrito por Nonato & Bonse (2016) donde se cumple la misma premisa.

En el caso de PP/PET-5% no se cumple la misma ya que dichos valores son más altos que los obtenidos en la mezcla PP/PET-10%, sin embargo la tendencia en los dos perfiles de temperatura es la misma.

Los mejores resultados se obtuvieron bajo el segundo perfil de temperatura identificado como B (véase Tabla 9-3), donde se obtiene un 13,01% promedio superior a los resultados del tercer perfil de temperatura (C). La mezcla PP/PET-30% (B₄) con un valor de 33,74 MPa, la mezcla PP/PET-20% (B₃) con 31,07 MPa y la mezcla PP/PET-5% (B₁) con 30,05 MPa, son las mejores opciones ante esta característica, cuyos valores son superiores a 30 MPa.

En la gráfico 3-4 se muestran los valores de Modulo de Elasticidad MPa - % PP/PET de acuerdo con Nonato & Bonse (2016) los valores del módulo de elasticidad deben ser directamente proporcionales al % de PET añadido en la matriz de PP, es decir si el porcentaje aumenta el valor del módulo debería hacerlo también y viceversa, para el perfil de temperatura B, se mantiene el valor del módulo constante a lo largo del proceso llevado a cabo, lo contrario se observa al trabajar bajo las condiciones del perfil de temperatura C, donde si se cumple lo descrito por el mencionado autor. El valor más alto obtenido, siendo de 2372,35 [MPa], correspondiente a PP/PET-20% (C₃) y bajo éste se encuentra el valor de 1708,46 [MPa] constante, ya mencionado.

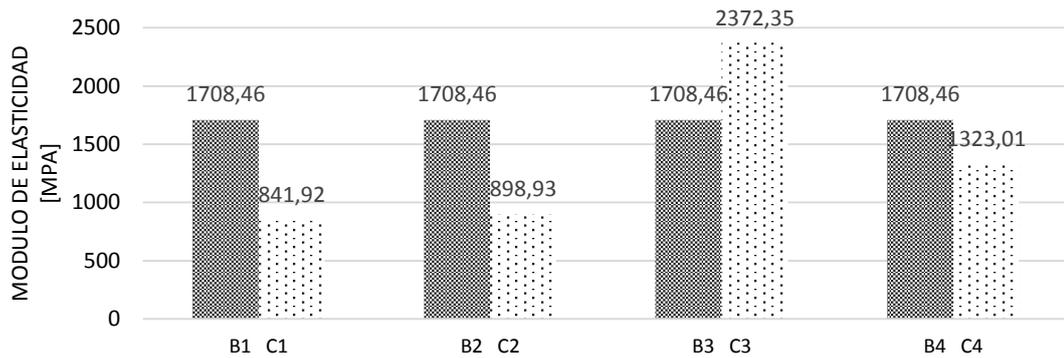


Gráfico 3-4: Modulo de Elasticidad (Flexión) [MPa] - % PP/PET.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

4.2.3 Ensayo de Tracción.

Este ensayo es el más representativo ante la caracterización de las propiedades mecánicas de un material, el análisis se basa en tres datos fundamentales, siendo sin embargo el utilizado para la elección del material según la necesidad requerida el esfuerzo de fluencia seguido por el módulo de elasticidad (módulo de Young) debido a que este parámetro caracteriza el comportamiento de un material considerado como elástico (Zhang, Wang y Mai 2019).

Tabla 10-4: Informe de Resultados. Ensayo de Tracción PP/PET.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET									
NORMA NTE INEN 2043:2013									
Características	Unidades	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
Espesor	mm	4,30	4,30	4,50	4,30	4,10	4,30	4,40	4,00
Anchura	mm	5,70	5,80	5,60	5,90	5,60	5,60	5,80	5,80
Sección Transversal	mm ²	24,51	24,94	25,20	25,37	22,96	24,08	25,52	23,20
Módulo de Elasticidad	MPa	1,17 x 10 ³	1,21 x 10 ³	1,37 x 10 ³	1,12 x 10 ³	8,46 x 10 ²	7,51 x 10 ²	1,11 x 10 ³	1,69 x 10 ³
Carga de Fluencia	N	360,30	421,49	398,16	317,13	399,50	397,32	403,22	359,60
Esfuerzo de Fluencia	MPa	14,70	16,90	15,80	12,50	17,40	16,50	15,80	15,50
Carga Máxima	N	456,17	489,52	445,37	398,29	435,56	470,88	416,93	365,91
Esfuerzo Máximo	mm	18,61	19,63	17,67	15,7	18,97	19,55	16,34	15,77
Porcentaje de elongación	%	2	3,2	2,8	3,6	4,8	1,2	2	1,2

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV.

En la tabla 10-4 describe los resultados ante el ensayo de tracción o tensión de la mezcla de PP/PET bajo los dos perfiles de temperatura descritos.

En los gráficos 4-4 y 5-4 se muestra los Parámetros del ensayo [MPa] – %PP/PET, donde se observa el esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia y porcentaje de elongación para cada uno de los porcentajes de PET añadidos a la matriz.

Dentro del esfuerzo de fluencia los datos muestran una tendencia dentro de cada perfil de temperatura teniendo su pico más alto cuando se trabaja con la mezcla PP/PET-10% con valores de 16,90 y 16,50 [MPa] para los perfiles B y C (véase tabla 12.3) respectivamente, seguido por los valores de 15,80 [MPa] para PP/PET-20% siendo igual en los dos perfiles. El valor más bajo de este parámetro se tiene en el porcentaje máximo de PET (5%) añadido a la matriz con valores de 12,50 y 15,50 [MPa] para B y C respectivamente.

Es decir el esfuerzo de fluencia es inversamente proporcional al porcentaje de PET añadido, conforme a ello si aumentamos el % PET menor será el esfuerzo de fluencia. Generalmente para la elección de materiales este es el parámetro que mayor influencia tiene al momento de llevar a cabo la elección (Askeland, Fulay y Wright 2011).

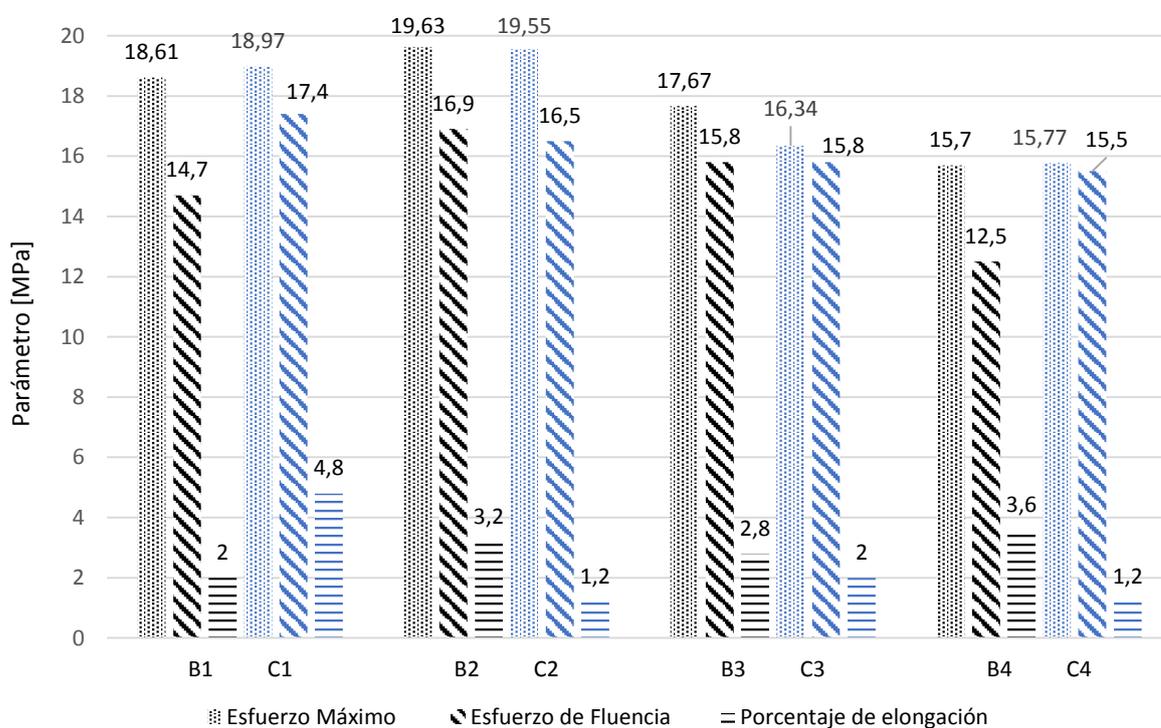


Gráfico 4-4: Parámetros [MPa] – % PP/PET.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Para el análisis del esfuerzo máximo es necesario tomar en cuenta que este valor es el límite máximo al que llega un material, después de este ocurre la fractura; en este caso se observa una tendencia de lo que ocurre, al igual que en el parámetro anterior existe una relación inversamente proporcional a medida que aumenta el %PET disminuye el valor del esfuerzo máximo aumenta. 19,63 [MPa] y 19,55 [MPa] son los valores más altos correspondientes a PP/PET-10% para los perfiles B y C. Los valores más bajos como se mencionó son para las mezclas PP/PET-30% con 15,70 y 15,77 [MPa] según corresponda a los perfiles de temperatura configurados. Lo cual coincide con el estudio realizado por Jaziri et al., 2016 donde los porcentajes de PET en la matriz de PP es de 5 – 10 – 15 y 20.

Jaziri et al., 2016 también demuestra que la relación entre % PET y % de elongación es directamente proporcional, lo que se confirma en este estudio en cuanto al perfil de temperatura B donde el máximo valor es de 3,6 para PP/PET-30% y el valor mínimo corresponde a 2% en PP/PET-5%. Para el perfil de temperatura C esto no se cumple manteniendo la relación inversa de los anteriores parámetros expuestos, el valor máximo en la mezcla PP/PET-5% es de 4,8% y el mínimo de 1,2 para PP/PET-10% y PP/PET-30%.

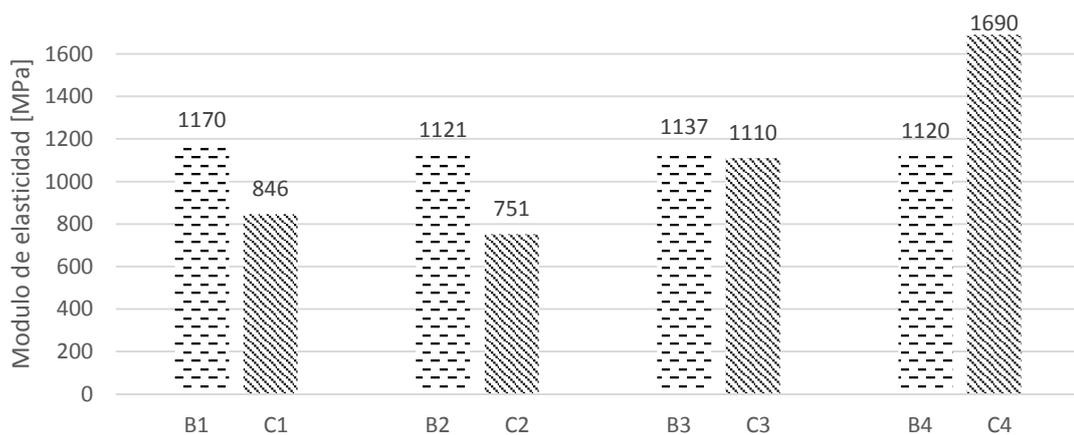


Gráfico 5-4: Modulo de elasticidad (Tracción) [MPa] – % PP/PET.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

El módulo de elasticidad cumple con las mismas condiciones descritas en el porcentaje de elongación; al perfil de temperatura °C se exhibe el valor de 1690 [MPa] para PP/PET-30% y el valor mínimo corresponde a 751 [MPa] en PP/PET-10%. En tanto para el perfil de temperatura B el valor máximo es de 1120 [MPa] en PP/PET-5% y el valor mínimo de 1120 [MPa] para PP/PET-30%. Lo que demuestra un resultado contradictorio de un perfil de temperatura a otra.

4.2.4 Ensayo de Compresión.

Dentro de este ensayo el modulo aparente de elasticidad determina la resistencia a la compresión del material el mejor resultado se obtiene a mayores temperaturas de extrusión y mayor porcentaje de PET utilizado, siendo este de 148,44 [MPa] en PP/PET-30% y el mínimo en 137,71 [MPa] en PP/PET-5% al perfil de temperatura C. Para el perfil de temperatura B el mayor modulo aparente de elasticidad es de 145,57 [MPa] en PP/PET-10% y un mínimo de 133,42 [MPa] en PP/PET-30%. Este ensayo no representa mayor información en cuanto a las posibles utilidades de los polímeros en el sector objetivo del proyecto, por tanto su influencia es relativamente baja en el presente estudio.

Tabla 11-4: Informe de Resultados. Ensayo de Compresión PP/PET.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET									
NORMA NTE INEN-ISO 604									
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
<i>Diámetro</i>	mm	26,2	25,8	26,4	26,7	26,7	25,5	26	25,7
<i>Sección Transversal</i>	mm	539,1	522,8	547,4	559,9	559,9	510,7	530,9	518,7
<i>Módulo Aparente de Elasticidad</i>	MPa	144,31	145,57	140,3	133,42	137,71	151,56	144,66	148,44
<i>Carga Máxima</i>	N	13560	12420	9600	9700	13620	11400	9980	13140
<i>Esfuerzo Máximo</i>	MPa	25,15	23,76	17,54	17,32	24,33	22,32	18,80	25,33

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV

4.2.5 Ensayo de Dureza

El módulo de Dureza Shore registrado para la materia prima es de 62,5. Cuando se trabaja en la temperatura más alta propuesta a medida que se aumenta el porcentaje de PET en la matriz de PP el módulo de Dureza Shore D disminuye esto debido a que a mayor temperatura las cadenas de polipropileno se degradan en un grado mayor al que lo hace en el perfil de temperatura B.

Al igual mientras se mantenga un mínimo porcentaje de PET en la matriz el valor de Dureza Shore D es mayor, en este sentido la mejor opción para el mejoramiento de las propiedades físicas del PP reciclado es PP/PET-5% como se muestra en la tabla 12-4.

Tabla 12-4: Informe de Resultados. Ensayo de Dureza Shore PP/PET.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET									
NORMA NTE INEN-ISO 868									
<i>Numero</i>									
<i>de</i>	<i>Unidad</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
<i>medidas</i>									
1		68,5	62	66,5	63,5	62	61,5	60,5	60,5
2	Dureza	65,5	65,5	65,5	62	61,5	62	60,5	60
3	Shore	66,5	65	60	59	59,5	59	61	60,5
<i>Promedio</i>		66,83	64,17	64,00	61,50	61,00	60,83	60,67	60,33

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

4.2.6 Microscopia Electrónica de Barrido.

La figura 5-4 muestra la microscopia de la mezcla PP/PET para el perfil de temperatura B. En la figura 5-4 a, b, c y d donde se observa el tipo de fractura que tiene lugar en las probetas sometidas a tracción, estas pueden ser definidas como moderadamente dúctiles, ya que están presentando una zona de deformación elástica elevada. Como se observa la fractura tiene un aspecto fibroso en forma de cizalladura, siendo estas más evidentes en la figura 10-4 c, d correspondientes a PP/PET-20% y PP/PET-30%. Se puede ver además en la figura 5-4 a', b', c' y d' la estructura morfológica del material extruido, en 5-4 a' y 5-4 b' es posible observar un sistema homogéneo debido a la baja cantidad de PET en la matriz de PP, bajo una clara adhesión de las fases. Al mezclar dos polímeros juntos generalmente no se garantiza una buena adhesión interfásica (Jaziri, Baccouc y Mbarek 2016) por lo que es posible observar un sistema heterogéneo de dos fases, donde hay una fase continua (matriz) y dominios donde la superficie se muestra muy bien definida y que caracterizan una baja adhesión entre las fases.

Tabla 13-4: Composición % de las mezclas PP/PET.

MEZCLAS EXTRUIDAS									
<i>ELEMENTOS</i>		<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
<i>C</i>		91,67	94,60	90,41	89,06	84,31	83,12	83,5	80,27
<i>O</i>		7,30	5,15	9,25	10,54	15,69	16,90	16,5	19,73
<i>Na</i>	%	0,91	0,11	-	-	-	-	-	-
<i>Si</i>		1,40	0,14	0,34	0,31	-	-	-	-
<i>Ca</i>		1,48	-	-	0,09	-	-	-	-

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

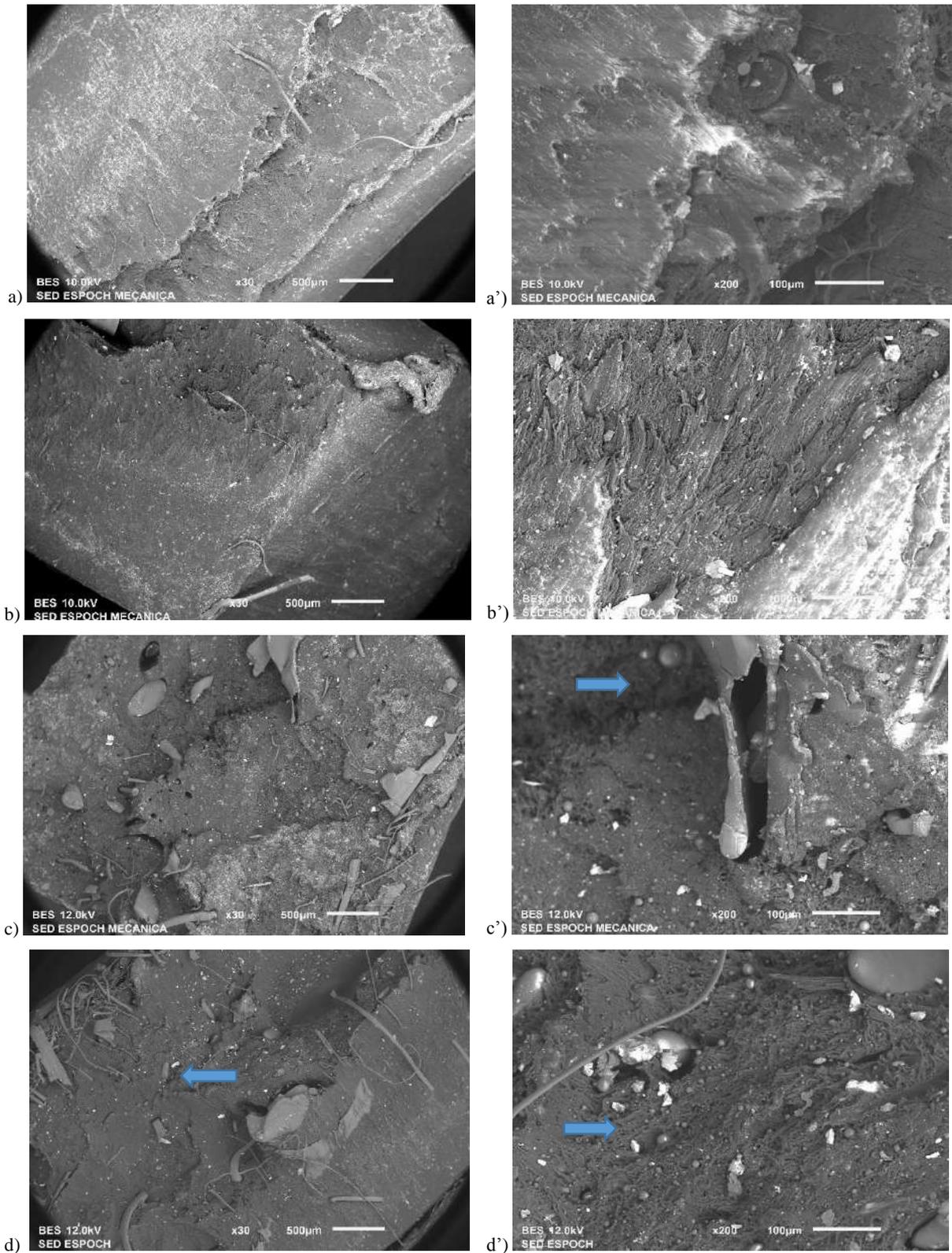


Figura 5-4: SEM probetas PP/PET. Perfil de temperatura B.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Nota: a), b), c), d) SEM imagen de PP/PET (fractura por tracción). a'), b'), c'), d') SEM imagen de estructura morfológica de PP/PET. (PP/PET-5%, PP/PET-10%, PP/PET-20%, PP/PET-30%)

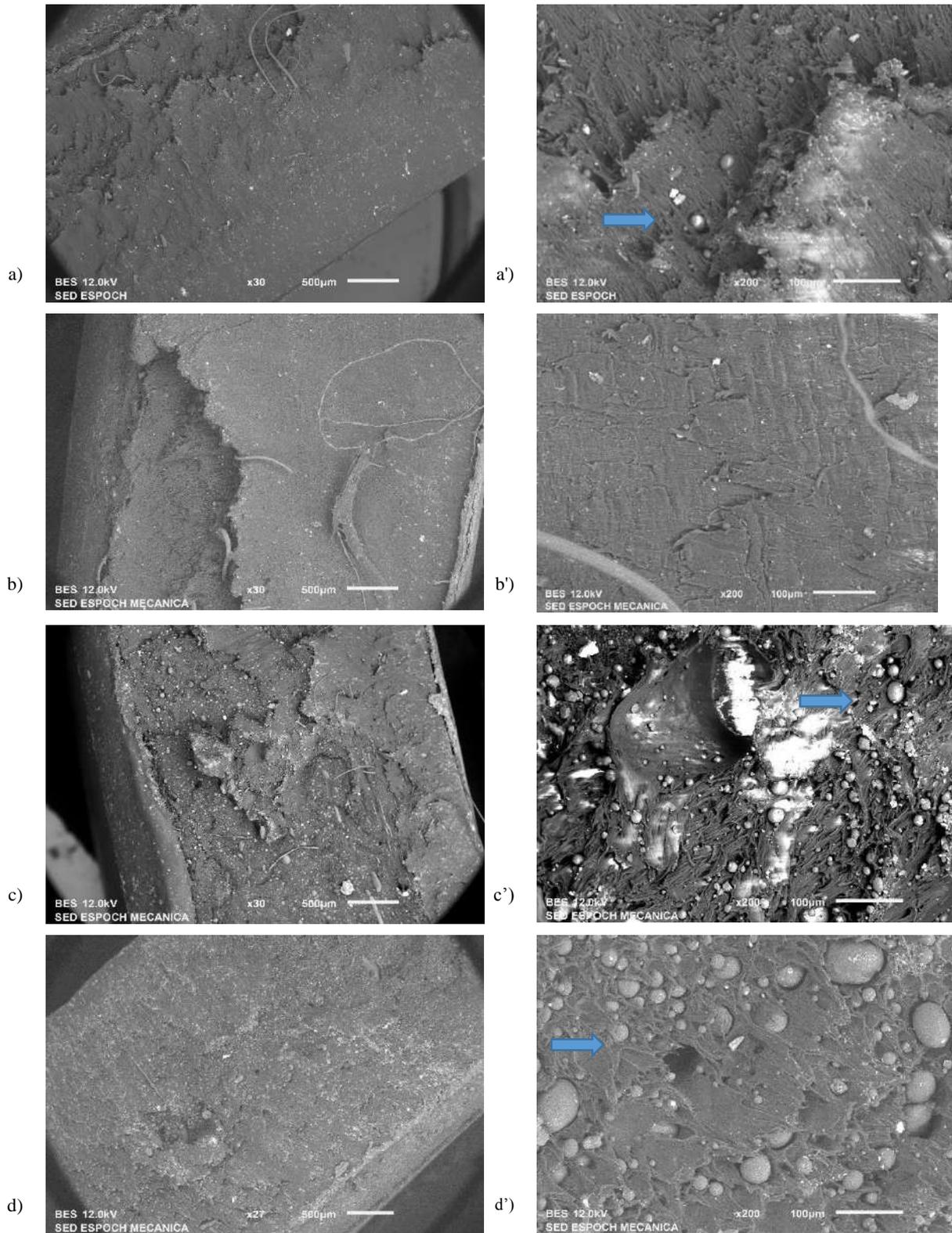


Figura 6-4: SEM probetas PP/PET. Perfil de temperatura C.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

Nota: a), b), c), d) SEM imagen de PP/PET (fractura por tracción). a'), b'), c'), d') SEM imagen de estructura morfológica de PP/PET. (PP/PET-5%, PP/PET-10%, PP/PET-20%, PP/PET-30%)

La figura 6-4 muestra la microscopía de la mezcla PP/PET para el perfil de temperatura C (véase tabla 9-3). Se observa el tipo de fractura que tiene lugar en las probetas sometidas a tracción, estas al igual que en el caso anterior pueden ser definidas como moderadamente dúctiles, ya que están presentando una zona de deformación elástica elevada. El aspecto fibroso en forma de cizalladura se mantiene, siendo más evidente en la figura 6-4 c, d correspondientes a PP/PET-5% y PP/PET-30%.

Debido a la temperatura de extrusión en este caso no se evidencian escamas en la matriz sin fundir.

En la figura 6-4 a', b', c' y d' se muestra la estructura morfológica del material extruido, en 6-4 c' y 6-4 d' es posible observar un sistema heterogéneo debido que al mezclar dos polímeros generalmente no se garantiza una buena adhesión interfásica (Jaziri, Baccouc y Mbarek 2016), hay una fase continua (matriz) y dominios donde la superficie se muestra muy bien definida y que caracterizan una baja adhesión entre las fases. Se observan depósitos de PET reciclado localizados a lo largo de toda la matriz con forma de gotas, donde la miscibilidad de la mezcla es baja, esto se refleja de mejor forma en la composición PP/PET-30%.

En la tabla 6-4 se tiene la composición porcentual de la mezcla al perfil de temperatura C, se observa el gradual aumento de oxígeno en las estructuras según se aumenta el contenido de PET reciclado a la mezcla extruida.

Se estableció mediante espectroscopía dispersiva de energía de rayos X para determinar la composición de la matriz y la fase dispersa los resultados se exponen en la tabla 13-4. Existen elementos en porcentajes menores al 2% los cuales pueden pertenecer a diferentes aditivos y colorantes que el PP pudiese poseer debido a su naturaleza de reciclado, puesto que fue sometido a tratamientos químicos y físicos para su utilidad, los cuales no es posible removerlos de la matriz de polipropileno.

4.3 Análisis Comparativo.

Con los resultados de las diferentes pruebas, es necesario determinar en qué condiciones es posible mejorar las propiedades físicas y mecánicas del polipropileno reciclado mediante la adición de polietileno tereftalato reciclado, conforme a lo observado en los resultados de los ensayos mecánicos anteriormente expuestos se puede afirmar que dependiendo de las modificaciones que se realice a la matriz de PP reciclado se podrá mejorar uno u otro parámetro del mismo.

A continuación se presenta una tabla comparativa de los parámetros más significativos a la hora de entender y conocer el comportamiento del material, en este caso la mezcla extruida.

Tabla 14-4: Comparación de las propiedades mecánicas obtenidas.

		MEZCLAS EXTRUIDAS								
		PP	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
TRACCIÓN	Esfuerzo de Fluencia [Mpa]	15,90	14,70	16,90	15,80	12,50	17,40	16,50	15,80	15,50
	Esfuerzo Máximo [Mpa]	18,48	18,61	19,63	17,67	15,70	18,97	19,55	16,34	15,77
	Porcentaje de Elongación [%]	3,80	2,00	3,20	2,80	3,60	4,80	1,20	2,00	1,20
FLEXIÓN	Modulo Aparente de Elasticidad [Mpa]	1149,45	1708,46	1708,46	1708,46	1708,46	841,92	898,93	2372,35	1323,01
	Esfuerzo en la rotura [Mpa]	28,65	30,05	24,93	31,07	33,74	26,22	25,02	26,83	26,13
COMPRESION	Modulo Aparente de Elasticidad [Mpa]	141,27	144,31	145,57	140,3	133,42	137,71	151,56	144,66	148,44
	Esfuerzo Máximo [Mpa]	23,51	25,15	23,76	17,54	17,32	24,33	22,32	18,80	25,33
DUREZA	Shore D	62,5	66,83	64,17	64,00	61,50	61,00	60,83	60,67	60,33

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV

Nota: Los valores en color azul son las más altos dentro de cada parámetro.

En función a la resistencia a los *esfuerzos de tracción* el material base (polipropileno reciclado) muestra una mejora del 6,29 % y 9,43 % cuando se trabaja con la mezcla PP/PET-10% en el perfil de temperatura B y PP/PET-5% C respectivamente. Se debe tomar en cuenta que al trabajar con PP/PET-10% en el perfil de temperatura B, no solamente existe el porcentaje de mejora sino también supone una inversión menor de energía para el procesamiento y obtención de la misma.

A continuación se muestran las Curvas Esfuerzo [MPa] – Deformación Unitaria de cada perfil de temperatura donde se evidencia de mejor forma.

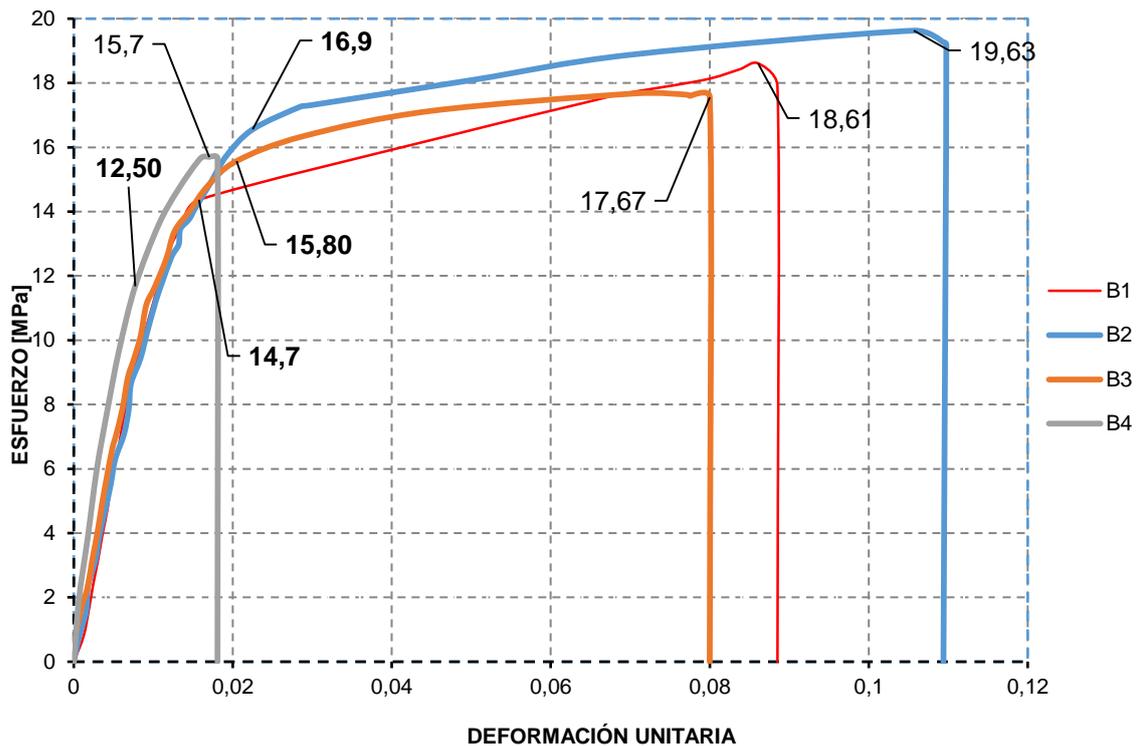


Gráfico 6-4: Curvas Esfuerzo [MPa] – Deformación Unitaria. Perfil de temperatura B.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

En el gráfico 6-4 se muestra que la curva correspondiente a B₂ presenta el mayor alargamiento en comparación a sus congéneres, en base a este se determina si un material tiende a ser dúctil o frágil.

En este caso se prefiere la ductilidad del material en relación a las características de su fractura, ya que esta no es súbita y espontánea como la fractura frágil; esta ocurre después de la deformación plástica que previene de la futura ruptura lo que permite tomar medidas preventivas. Otra de las razones es que para inducir una fractura dúctil es necesaria mayor energía de deformación (Callister et al. 2016).

En 7-4 se muestra que la curva de esfuerzo correspondiente a C₁ tiene un mayor porcentaje de elongación de 4,80 en relación a las otras condiciones estudiadas y un esfuerzo de fluencia de 17,40 [MPa].

Como se observa al aumentar el porcentaje de PET en la matriz la deformación unitaria del material disminuye considerablemente, esto debido a la naturaleza propia del mismo, así se puede determinar que el límite en el cual es posible mejorar las propiedades del material es al añadir como límite un 20% de PET a la matriz de PP, estas consideraciones se toman en cuenta al trabajar con materiales reciclados.

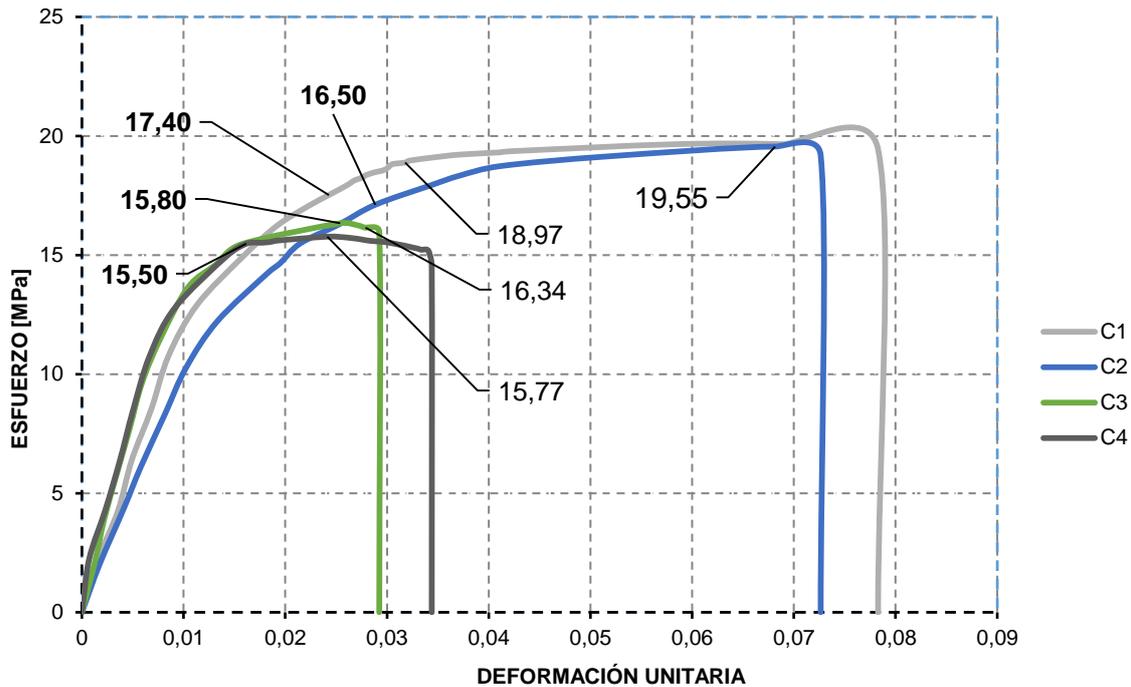


Gráfico 7-4: Curvas Esfuerzo [MPa] – Deformación Unitaria. Perfil de temperatura C.

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

Como se mencionó en el *ensayo de flexión* el parámetro a estudiar es el esfuerzo en la rotura, en comparación con la materia prima (PP reciclado) muestra una mejora del 17,77% y 8,45% como valores máximos, los cuales se procesan en el perfil de temperatura B correspondientes a los porcentajes más altos de PET en la matriz PP/PET-20% y PP/PET-30%. En tanto trabajando con la más alta temperatura configurada los parámetros en comparación con el PP reciclado son menores. Por lo tanto el perfil de temperatura B es el óptimo para las condiciones de trabajo.

En el *ensayo de compresión* la mejora se evidencia con porcentajes de 3,04% y 2,15% los cuales corresponden trabajando en el perfil de temperatura B, en las mezclas PP/PET-10% y PP/PET-5%.

Para el módulo de *dureza de Shore D* los valores de mejora son de 6,93% y 2,62%, estos obtenidos en el perfil de temperatura B es decir el más bajo estudiado, en la mezcla PP/PET-5% y PP/PET-10%. Se evidencia que si se trabaja en el perfil de mayor temperatura configurada los valores de dureza son inferiores al de la materia prima.

De esta forma la elección de las condiciones de trabajo dependen netamente de lo que se busca del material y de la función que se plantee éste realice.

Para el presente proyecto se decidió orientar las características del material hacia el sector de la construcción donde las exigencias de la materia prima en ciertas ramas de la misma demandan una buena resistencia a los esfuerzos de flexión, como por ejemplo las vigas que soportan el sistema de

grúas viajeras múltiples están sometidas a cargas transversales que provocan la flexión de las mismas (Beer et al. 2010).

Sin embargo los polímeros tiene mayor utilidad ante lo descrito por Beer et al., (2010); así específicamente se busca que el material se adapte a sectores como instalaciones eléctricas y acuíferas, etc. Además para el transporte de otros materiales donde se aplican esfuerzos transversales que también exigen principalmente características de flexión mayores a las otras.

Es por ello que en el presente estudio se decidió realizar una compatibilización mediante la adición de un acoplante, específicamente la composición de la mezcla extruida que mayor esfuerzo en la rotura [MPa] presente, siendo esta la identificada como B₂, es decir la composición PP/PET-30% extruida en el perfil de temperatura B, para estudiar el comportamiento mecánico de dicha mezcla ante el compatibilizador y así tratar de mejorar con porcentajes más altos a la materia prima (polipropileno reciclado).

4.4 Caracterización de probetas mezcla PP/PET y anhídrido ftálico.

Como se mencionó al mezclar dos polímeros juntos generalmente no se garantiza una buena adhesión interfásica. Para el mejoramiento de las propiedades mecánicas se requiere una unión interfacial adecuada es por ello que al añadir un compatibilizador como el anhídrido ftálico se espera mejorar los resultados ante la mezcla propuesta (Jaziri, Baccouc y Mbarek 2016), perfil de temperatura B (véase tabla 9-3) PP/PET-30%.

4.4.1 Ensayo de Flexión.

En la tabla 15-4 se analizan los valores de esfuerzo en la rotura [Mpa] donde se puede observar que al añadir el acoplante las propiedades mecánicas no muestran una mayor variación, conforme lo encontrado por Zhang et al. (2019).

El valor más alto expuesto en esta prueba es de 33,26 [MPa] para el esfuerzo de rotura, con una variación de 1 punto entre los resultados de las demás concentraciones de acoplante.

Tabla 15-4: Informe de Resultados. Ensayo de Flexión PP/PET/Anhídrido Ftálico.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET/Anhídrido Ftálico					
NORMA NTE INEN 2047:2013					
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>B4</i>	<i>Anhídrido Ftálico 1%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 2%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 3%</i>
<i>Espesor</i>	mm	4,0	4,2	4,4	4,2
<i>Anchura</i>	mm	22,6	24,1	24,8	23,2
<i>Sección Transversal</i>	mm ²	90,40	101,22	109,12	97,44
<i>Módulo de Elasticidad</i>	MPa	1708	1750,36	1184,61	2908,94
<i>Carga de Rotura</i>	N	81,34	67,62	82,32	82,52
<i>Esfuerzo en la Rotura</i>	MPa	33,74	33,26	32,15	32,02
<i>Flecha en la rotura</i>	mm	17,96	11,86	15,40	9,04

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV.

4.4.2 Ensayo de Tracción.

En la tabla 16-4 se observa los resultados al ensayo de tracción de la mezcla con compatibilizador.

Tabla 16-4: Informe de Resultados. Ensayo de Tracción PP/PET/Anhídrido Ftálico.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET/Anhídrido Ftálico					
NORMA NTE INEN 2043:2013					
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>B4</i>	<i>Anhídrido Ftálico 1%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 2%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 3%</i>
<i>Espesor</i>	mm	4,3	5,1	4,55	4,55
<i>Anchura</i>	mm	5,9	5,75	5,85	5,8
<i>Sección Transversal</i>	mm ²	25,37	29,4	26,63	26,37
<i>Módulo de Elasticidad</i>	MPa	1,12E+03	1,85E+03	1,51E+03	1,36E+03
<i>Carga de Fluencia</i>	N	317,13	393,52	301,9	321,46
<i>Esfuerzo de Fluencia</i>	MPa	12,5	13,5	11,35	12,2
<i>Carga Máxima</i>	N	398,29	435,08	365,92	355,61
<i>Esfuerzo Máximo</i>	mm	15,7	15	13,71	13,51
<i>Porcentaje de elongación</i>	%	3,6	1,2	4	4,2

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV.

Se puede observar que al menor porcentaje de anhídrido ftálico se tiene una mejora en el esfuerzo de fluencia del 8%, ante la mezcla sin compatibilizador, por lo cual ante una mayor cantidad de anhídrido ftálico en la matriz disminuye el parámetro estudiado.

4.4.3 *Ensayo de Compresión.*

Los mejores resultados se obtuvieron en esta prueba refiriéndose a los módulos aparentes de elasticidad donde los valores son considerablemente mayores a los obtenidos sin compatibilizador, coincidiendo con lo visto anteriormente en los resultados de tracción en donde el menor porcentaje de anhídrido ftálico proporciona la mejora buscada.

En la tabla 17-4 se observa el comportamiento de la mezcla compatibilizada y la que no.

Tabla 17-4: Informe de Resultados. Ensayo de Compresión PP/PET/Anhídrido Ftálico.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET/Anhídrido Ftálico					
NORMA NTE INEN-ISO 604					
<i>Características</i>	<i>Unidad</i>	<i>B4</i>	<i>Anhídrido Ftálico 1%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 2%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 3%</i>
<i>Diámetro</i>	mm	26,7	24,8	25,9	26,4
<i>Sección Transversal</i>	mm	559,9	483,1	526,9	547,4
<i>Módulo Aparente de Elasticidad</i>	MPa	133,42	83963,32	263078,2	453615,8
<i>Carga Máxima</i>	MPa	9700	13120	10820	13040
<i>Esfuerzo Máximo</i>	MPa	17,32	27,16	20,54	23,82

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

Fuente: Laboratorio Ensayo de Materiales LENMAV

4.4.4 *Ensayo de Dureza.*

Dentro de esta propiedad mecánica se puede observar que a medida que aumenta la concentración del compatibilizador los valores disminuyen en porcentajes de 0,81 y 0,93.

Al añadir el porcentaje más bajo de anhídrido ftálico se tiene una mejora del 1,09 % para el módulo de Dureza Shore.

Tabla 18-4: Informe de Resultados. Ensayo de Dureza Shore
PP/PET/Anhídrido Ftálico.

TIPO DE MATERIAL: Mezcla PP/PET/Anhídrido Ftálico					
NORMA NTE INEN-ISO 868					
<i>Numero de medidas</i>	<i>Unidad</i>	<i>B4</i>	<i>Anhídrido</i>	<i>Anhídrido</i>	<i>Anhídrido</i>
			<i>Ftálico</i> 1%	<i>Ftálico</i> 2%	<i>Ftálico</i> 3%
1		63,5	62,5	61,2	61,0
2	Dureza	62	61,2	60,8	60,5
3	Shore	59	61,5	61	61,3
<i>Promedio</i>		61,50	61,73	61,0	60,93

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

4.4.5 *Microscopia Electrónica de Barrido.*

La figura 7-4 muestra la microscopia de la mezcla PP/PET-30%, compatibilizada con anhídrido ftálico en distintos porcentajes (véase en la tabla 14.3).

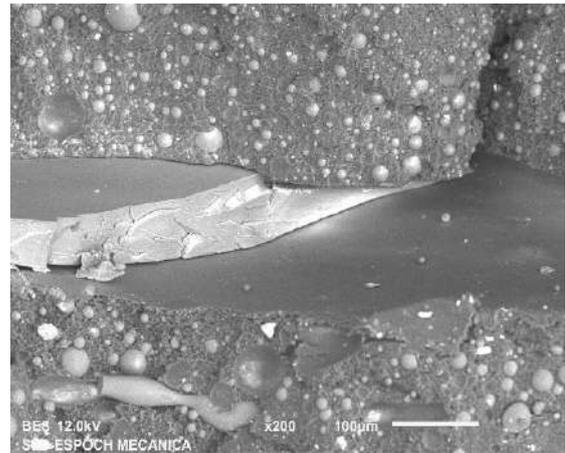
Se observa en la figura 7-4 a, b y c, el tipo de fractura que tiene lugar en las probetas sometidas a tracción, estas al igual que en lo previsto en el estudio sin compatibilizador presentan una tendencia mayor hacia la fractura dúctil.

Tal como lo mencionan Inuwa et al. (2015) y Akbari, Zadhoush, & Haghghat (2006) la presencia del compatibilizador cambia la estructura morfológica del material, ya que éste ayuda a la miscibilidad de los polímeros extruidos. Es así que figura 7-4 a', b' y c' se muestra la estructura morfológica del material extruido, donde se observa que la fase continua (matriz) contiene PET reciclado localizados a lo largo de toda la matriz con forma de gotas estas son de menor tamaño que las observadas en las muestras sin compatibilizador, donde la miscibilidad de la mezcla se ve beneficiada por la presencia de anhídrido ftálico.

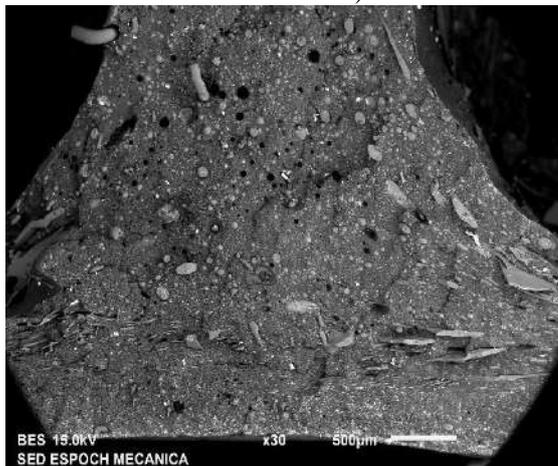
En las imágenes la parte más brillante corresponde al material de mayor densidad en este caso el PET reciclado, como la distribución del polietileno tereftalato es mejor y se encuentra por toda la matriz de PP reciclado (Teixeira et al. 2008).



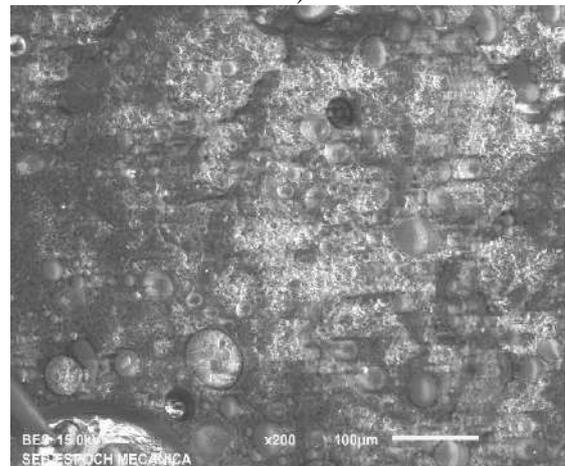
a)



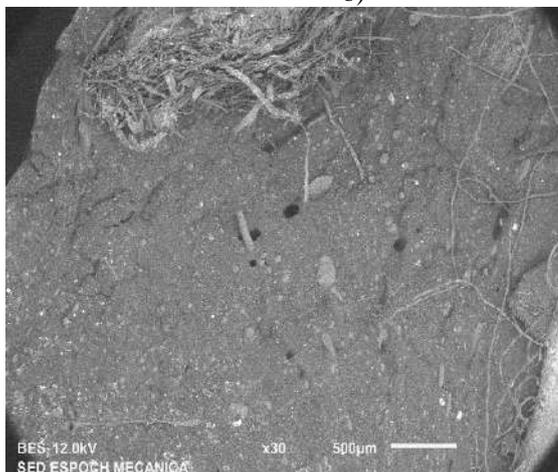
a')



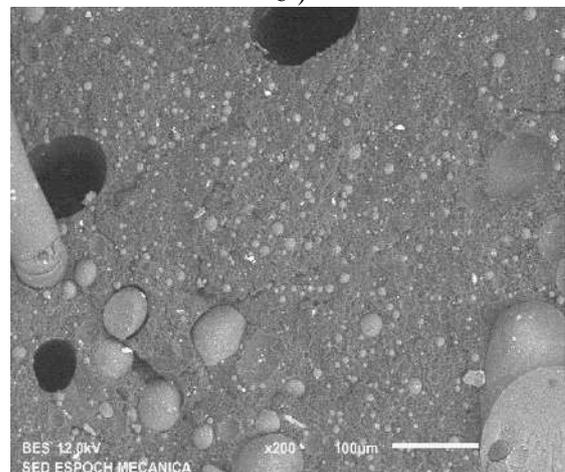
b)



b')



c)



c')

Figura 7-4: SEM probetas PP/PET/Anhídrido ftálico.

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Nota: a), b), c) SEM imagen de PP/PET/Anhídrido ftálico (fractura por tracción), a'), b'), c') SEM imagen de estructura morfológica de PP/PET/ Anhídrido ftálico. (PP/PET-30%)

En la tabla 19-4 se tiene la composición porcentual de la mezcla compatibilizada, se observa el

gradual aumento de oxígeno en las estructuras según se aumenta el contenido de PET reciclado y compatibilizador a la mezcla extruida.

Tabla 19-4: Composición % de las mezclas PP/PET/Anhídrido Ftálico.

MEZCLAS EXTRUIDAS				
<i>ELEMENTOS</i>		<i>Anhídrido Ftálico 1%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 2%</i>	<i>Anhídrido Ftálico 3%</i>
<i>C</i>		89,36	79,58	78,57
<i>O</i>	%	10,64	20,11	21,43
<i>Ca</i>		-	-	0,31

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

4.5 Efecto del compatibilizador en la mezcla PP/PET

Tabla 20-4: Comparación entre la mezcla con compatibilizador y sin acoplante.

		Mezclas Extruidas			
		B4	Anhídrido Ftálico 1%	Anhídrido Ftálico 2%	Anhídrido Ftálico 3%
TRACCIÓN	Esfuerzo de Fluencia [Mpa]	12,5	13,5	11,35	12,2
	Esfuerzo Máximo [Mpa]	15,7	15	13,71	13,51
	Porcentaje de Elongación [%]	3,6	1,2	4	4,2
FLEXIÓN	Modulo Aparente de Elasticidad [Mpa]	1708,46	1750,36	1184,61	2908,94
	Esfuerzo en la rotura [Mpa]	33,74	33,26	32,15	32,02
COMPRESION	Modulo Aparente de Elasticidad [Mpa]	133,42	83963,32	263078,2	453615,8
	Esfuerzo Máximo [Mpa]	17,32	27,16	20,54	23,82
DUREZA	Shore D	61,5	61,73	61	60,93

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Aunque los acoplantes se usan generalmente para mejorar la compatibilidad entre PET y PP, poco es lo que se ha reportado sobre el efecto del compatibilizador sobre las propiedades mecánicas de PET reciclado. Las propiedades mecánicas de las mezclas de PP/PET/Anhídrido Ftálico se muestran en la tabla 20-4. Se puede ver que en el caso de tracción (Esfuerzo de fluencia) al añadir una mayor concentración de compatibilizador las propiedades de la mezclas disminuyen siguiendo la tendencia: PP/PET-30%/Anhídrido Ftálico-3% < PP/PET-30%/Anhídrido Ftálico-2% < PP/PET-30%/Anhídrido Ftálico-1%.

Dentro de la resistencia a la flexión y dureza las propiedades muestran la misma tendencia que el parámetro anterior como sigue: PP/PET-30%/Anhídrido Ftálico-3% < PP/PET-30%/Anhídrido Ftálico-2% < PP/PET-30%/Anhídrido Ftálico-1%.

Como expone Tao & Mai (2017) y Tao et al. (2016) la reacción química entre el compatibilizador y el PET forma un copolímero de injerto, mejorando la adición interfásica entre el PET y el PP. Adicional debido a la naturaleza del material utilizado y según lo expuesto por Zhang, Wang & Mai (2019) la adición de compatibilizadores tiende a disminuir ligeramente la temperatura de cristalización, como lo demuestra el aumento de la resistencia a la tracción en las probetas que contienen anhídrido y PET.

A su vez la baja resistencia a la tracción y la flexión de las mezclas PP/PET debe atribuirse a la baja resistencia a la tracción y flexión del compatibilizador.

CAPITULO V

5. REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

5.1 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.

Los materiales utilizados para llevar a cabo el proceso se detallan en tabla 39.3.

Tabla 1-5: Requerimientos de proceso.

Materiales	Equipos	Reactivos
<ul style="list-style-type: none">• Mascarilla con filtros• Mandil• Guantes de temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Triturador de botellas plásticas.• Extrusor de tornillo simple o monohusillo	<ul style="list-style-type: none">• Anhídrido Ftálico• Hidróxido de Sodio• Detergente

Realizado por: Poalacin Daniela, 2019.

Para el proceso es necesario la implementación de una extrusora monohusillo o usillo simple, puesto que el presente estudio se llevó a cabo en base a las características de dicho equipo.

Extrusora monohusillo o husillo simple.

La extrusora de un solo tornillo es más común en el procesamiento de polímeros. Sus características de trabajo dependen en gran medida de las propiedades del material. En la extrusión reactiva, las extrusoras de un solo tornillo solo se pueden usar si los cambios de viscosidad del material son limitados (Janssen 2004).

De acuerdo con Morales (2010):

La máquina de extrusión de tornillo sencillo necesita un sistema motriz para funcionar: consiste en un motor de velocidad variable, un mecanismo de transmisión de engranes que permite girar al husillo en un rango adecuado de velocidad, un conjunto de cojinetes de aguante para absorber el impacto de empuje hacia atrás del husillo.

5.2 Análisis Costo/beneficio del proyecto.

5.2.1 Presupuesto

Para llevar a cabo el proyecto es necesario realizar un análisis económico de la inversión necesaria para la puesta en marcha del mismo. En el siguiente esquema se detallan a los montos reservados para cada actividad.

Tabla 2-5: Detalle Presupuestario

PRESUPUESTO			
ACTIVIDAD	MONTO	FUENTE DE FINANCIAMIENTO	
		INTERNA	EXTERNA
Adquisición de la materia prima (Polipropileno reciclado)	\$50,00	X	
Adquisición de botellas plásticas recicladas	\$20,00	X	
Lavado del PP en NaOH	\$20,00	X	
Lavado de las botellas PET	\$5,00	X	
Triturado de las botellas PET	\$25,00	X	
Adquisición de Anhídrido Ftálico	\$25,00	X	
Caracterización de las probetas de polipropileno reciclado	\$40,00	X	
Caracterización de las probetas de la mezcla realizada	\$700,00	X	
Molde para la obtención de probetas	\$100,00	X	
Guantes de temperatura, mascarilla con filtros	\$50,00	X	
Copias e impresiones	\$30,00	X	
Empastados	\$50,00	X	
Imprevistos	\$100,00	X	
TOTAL		\$1255,00	

Realizado por: Poalacín Daniela, 2019.

5.2.2 Análisis de Costos.

El costo más significativo es el consumo eléctrico de la extrusora. Según los datos de Tubón & Carillo (2014) el consumo de voltaje del extrusor utilizado es de 220 V y una Potencia de 1,98 KWh.

En el Ecuador actualmente el costo del consumo de KWh en el sector industrial es decir de alto voltaje es de \$ 1,414, por tanto en promedio para llevar a cabo el proyecto se trabajó por un periodo de 30 días con 5 horas de trabajo, teniendo un total de 150 horas.

Es así que en función a la potencia del equipo tenemos que por hora se pagaría un total de \$ 2,799 por hora de trabajo, dando como consumo final en el mes de trabajo un total de \$419.85. Dicho valor sería el cancelado en el caso de trabajar 6 horas diarias por 30 días en el sector industrial.

Es por ello que dentro del análisis de resultados se contempla la mejor opción no solo para el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de la materia prima, sino se trabaja a la par con la mejor opción en cuanto al consumo energético y por tanto menor inversión económica para el fin perseguido.

CONCLUSIONES

- A las condiciones establecidas en la extrusora de monohusillo para la obtención de probetas de la matriz de PET y PP reciclado se determinó el siguiente perfil de temperatura desde la zona de alimentación hasta la boquilla: 155/190/190/190, con una velocidad del tornillo de 350 rpm y una presión de moldeado de 31 MPa.
- La materia prima utilizada presentó propiedades físicas, mecánicas y morfológicas propias de la naturaleza del material, al tener la cualidad de *reciclado*, los valores vistos presentan una desviación menor a los que se verían de ser un material puro. Porcentualmente la composición del polipropileno reciclado por microscopía utilizado fue de 100 % C, un esfuerzo de fluencia en tracción de 15,90, esfuerzo a la rotura de flexión de 28,65 y un módulo de dureza de Shore de 62,5.
- La adición de polietileno tereftalato reciclado (PET) por proceso de extrusión tiene un efecto positivo en la matriz de polipropileno reciclado (PP) siendo la mezcla de mejor comportamiento la del 10% de PET mejorando las propiedades físicas y mecánicas de este último para el ensayo de tracción en un 6,29%, en el ensayo de flexión de 17,77%. Para compresión la mejora se evidencia con un 3,04 % y para Dureza Shore D el porcentaje de mejora es de 2,62%.
- Las características físicas y mecánicas del producto obtenido en base a la mezcla realizada muestran un cambio en la matriz de polipropileno utilizado como base, dicho cambio proviene del mismo proceso de extrusión llevado a cabo y de la utilización o no del compatibilizante, de tal forma que si este es utilizado las fases entre PP/PET tendrán características diferentes tanto estructuralmente como en las propiedades mecánicas.
- Al añadir porcentajes de acoplante (anhídrido ftálico) en el orden de 1%, 2% y 3 a la mezcla, ésta evidencia una mejora del 8% de resistencia al esfuerzo de tracción y del 56,81% en el parámetro de compresión

RECOMENDACIONES

- Antes del proceso de extrusión permitir un precalentamiento del equipo de por lo menos 1 hora, esto para que las temperaturas de cada una de las zonas logren estabilizarse correctamente.
- Mezclar adecuadamente el material antes de ser cargado a la tolva de alimentación de tal manera que su distribución sea uniforme.
- Utilizar mascarilla de filtros al momento de realizar la extrusión de la mezcla, de manera obligatoria al momento de trabajar con el compatibilizar puesto que existe una considerable emisión de vapores propios del proceso y material.
- No parar las rpm durante el proceso ya que esto produce un corte en el material extruido y su operatividad baja considerablemente.
- Trabajar el diámetro mínimo posible de las escamas de PET reciclado ya que esto permitirá una mejor extrusión del material, por tanto una mejor distribución al momento mezclarse en el proceso con el PP reciclado.

BIBLIOGRAFÍA

- AKBARI, M., ZADHOUSH, A. & HAGHIGHAT, M.**, 2006. *PET/PP Blending by Using PP-g-MA Synthesized by Solid Phase.* , DOI 10.1002/app.
- ASKELAND, D., FULAY, P. & WRIGHT, W.**, 2011. *Ciencia e ingeniería de materiales.* Sexta. Missouri: Cengage Learning.
- BEER, F., et al.**, 2010. *Mecánica de Materiales.* Quinta. Mexico: s.n.
- BELTRÁN, M. & MARCILLA, A.**, 2012. *Tecnología de polímeros Procesado y propiedades.* Madrid: Unión de Editoriales España. ISBN 978-84-9717-232-5.
- BILLMEYER, F.**, 2004. *Química.* New York: Revérte.
- CALLISTER, W., et al.**, 2016. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* Novena. S.l.: s.n. ISBN 9788429172515.
- CARDFELT, A.**, 2015. *Model system study of recycled polyethylene terephthalate and polypropylene blends.* S.l.: s.n.
- CLAVIJO, J.**, 2013. *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM).* Elementos, vol. 3, pp. 133-146. DOI ISSN-e 2248-5252.
- EGE, S.**, 2004. *Química Orgánica : estructura y reactividad.* Barcelona: Reverté.
- FINK, J.K.**, 2013. *Reactive Extrusion* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 978-0-8155-1515-9. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781455731497000152>.
- HYIE, et al.**, 2019. *Tensile and flexural investigation on polypropylene recycling.* Journal of Physics: Conf. Series 180 1234567890, DOI doi :10.1088/1742-6596/1174/1/012005.
- INUWA, et al.**, 2015. *Interface Modification of Compatibilized Polyethylene Terephthalate / Polypropylene Blends : Effect of Compatibilization on Thermomechanical Properties and Thermal Stability.* Journal of Vinyl and Additive Technology, vol. 23, no. 1. DOI 10.1002/vnl.
- JAZIRI, M., BACCOUC, S. & MBAREK, M.**, 2016. *Experimental investigation of the effects of a compatibilizing agent on the properties of a recycled poly (ethylene terephthalate) / polypropylene blend.* Polymer Bulletin, vol. 74, no. 3, pp. 839–856. ISSN 1436-2449. DOI 10.1007/s00289-016-1748-6.
- KENT, R. J.** (1998). *Plastics Profile Extrusion.* Shawbury : RAPRA TECHNOLOGY LTD.

- KOTSCHKINA, A. & INDUSTRY, P.**, 1968. *Determination of the Isotacticity of Polypropylene by Infrared Spectroscopy.* , vol. 3736, no. 16, pp. 3731-3736.
- LI, Y., XIE, X. & GUO, B.**, 2001. *Study on styrene-assisted melt free-radical grafting of maleic anhydride onto polypropylene.* , vol. 42, pp. 3419-3425.
- LUNA, I.Z., et.al.**, 2015. *Physical and Thermal Characterization of Alkali Treated Rice Husk Reinforced Physical and Thermal Characterization of Alkali Treated Rice Husk Reinforced Polypropylene Composites.* *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, no. July. DOI 10.1155/2015/907327.
- MADDAH, H.A.**, 2016. *Polypropylene as a Promising Plastic : A Review.* *American Journal of Polymer Science*, vol. 6, no. 1, pp. 1-11. DOI 10.5923/j.ajps.20160601.01.
- MORALES, J.** (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos.* Editorial Trillas Sa.
- NONATO, R.C. & BONSE, B.C.**, 2016. *A study of PP / PET composites : Factorial design , mechanical and thermal properties.* *Polymer Testing* [en línea], vol. 56, pp. 167-173. ISSN 0142-9418. DOI 10.1016/j.polymertesting.2016.10.005. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.005>.
- NTE INEN 2043:2013.** “*Plásticos. Método de Ensayo para la Determinación de las Propiedades de Tensión*”.
- NTE INEN 2047:2013.** “*Plásticos. Determinación de la Resistencia a la Flexión de los Materiales Plásticos Rígidos*”
- NTE INEN-ISO 604.** “*Plásticos. Determinación de las Propiedades en Compresión*”.
- NTE INEN-ISO 868.** “*Plásticos y Ebonita. Determinación de la Dureza de Indentación por medio de un Durómetro (Dureza Shore)*”.
- OBBER, C., et al.**, 2015. *Principles of Polymer Systems.* 6. S.l.: CRC Press. ISBN 978-1-4411-7756-8.
- PANG, Y.X., et al.**, 2000. *Effects of a compatibilizing agent on the morphology , interface and mechanical behaviour of polypropylene / poly (ethylene terephthalate) blends.* , vol. 41, pp. 357-365.
- POLO, D., et al.**, 2016. *Applications of new metallocene complexes in olefin polymerization.* *Ciencias experimentales y tecnología*, vol. 5, pp. 186. DOI 978-84-9982-018-7.
- POTIYARAJ, P., TANPICHAI, S. & PHANWIROJ, P.**, 2012. *Physical Properties of PP /*

- Recycled PET Blends Prepared by Pulverization Technique.* , vol. 489, pp. 109-113. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.109.
- ROSS, J.A., Y et al.**, 2001. *Minimización y manejo ambiental de residuos sólidos*. Mexico: Semarnat. ISBN 9688174971.
- SAUJANYA, C. & RADHAKRISHNAN, S.**, 2001. *Structure development and properties of PET @ bre @ lled PP composites*. Elsevier, vol. 42, pp. 4537-4548.
- SEYMOUR, R. & CARRAHER, C.**, 2002. *Introducción a la química de los polímeros*. S.l.: Reverté.
- SMITH, B.** (2018). *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach*. New York: CRC Press.
- TALARICO, G., ROSA, C. De & AURIEMMA, F.**, 2019. *Tacticity , Regio and Stereoregularity* [en línea]. S.l.: Springer International Publishing. ISBN 9783030129033. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-12903-3_1.
- TAO, Y. & MAI, K.**, 2017. *POLYMER Non-isothermal crystallization and melting behavior of compatibilized polypropylene / recycled poly (ethylene terephthalate) blends.* , vol. 43, pp. 3538-3549. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2007.05.007.
- TAO, Y., et al.**, 2016. *POLYMER Non-isothermal crystallization , melting behavior and polymorphism of polypropylene in b -nucleated polypropylene / recycled poly (ethylene terephthalate) blends.* , vol. 44, pp. 1165-1174. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2008.01.023.
- TEIXEIRA, R., et al.**, 2008. *Morphology and Crystallization Behavior of the PP / PET Nanocomposites.* , DOI 10.1002/app.
- TUBÓN, E. & CARILLO, B.**, 2014. “ *Diseño y construcción de un extrusor de tornillo para la obtención de pellets de ingeniero químico* [en línea]. S.l.: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/3506>.
- VIAN, Á., & OCÓN, J.** (1979). *Elementos de ingeniería química: (operaciones básicas)*. Aguilar.
- VIRGINIE, M.**, 2015. *Los caminos del reciclaje*. España: Nuevos Emprendimientos Editoriales SL. ISBN 9788493683252.
- YIN, S.**, 2017. *Development of Recycled Polypropylene Plastic Fibres to Reinforce Concrete*. S.l.: Springer Theses.

ZDRAZILOVA, N., et al., 2004. *Rheological Behaviour of PP / PET and Modified PP / PET Blends . II . Dynamic Viscoelastic Properties.* *Polymers & Polymer Composites*, vol. 12, no. 5, pp. 433-447.

ZHANG, Z., WANG, C. & MAI, K., 2019. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research Reinforcement of recycled PET for mechanical properties of isotactic polypropylene.* *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research [en línea]*, vol. 2, no. 2, pp. 69-76. ISSN 2542-5048. DOI 10.1016/j.aiepr.2019.02.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.02.001>.

ANEXOS

ANEXO A

EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROCESO



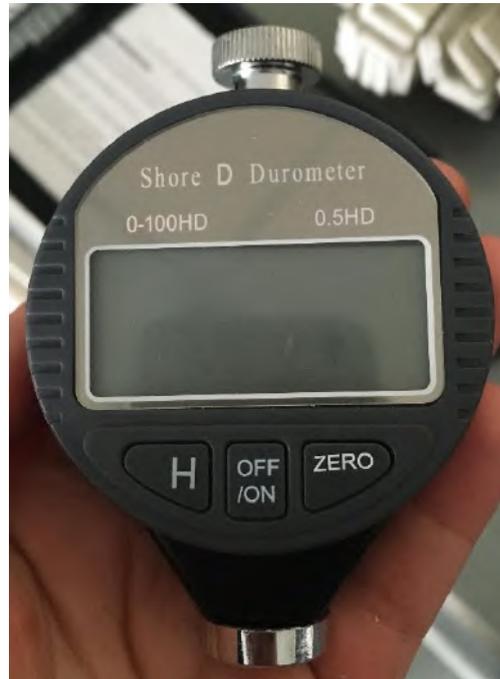
Extrusora Monohusillo



Maquina Universal de Ensayos - WAW600B

ANEXO B

EQUIPOS DE ENSAYOS MECÁNICOS



Durómetro Shore D



Muestras al SEM

ANEXO C
ENSAYOS MECÁNICOS



Ensayo de Tracción



Ensayo de Compresión

ANEXO D
PROBETAS PP/PET



Probetas antes de ser cortadas



Probetas listas para ensayos

ANEXO E

PROBETAS PP/PET ENSAYO DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN



Probetas después del ensayo de tracción



Cilindros para el ensayo de compresión

ANEXO F

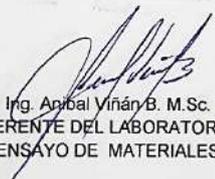
INFORME DE RESULTADOS TRACCIÓN



Ing. J. Anibal Viñán B. MSc.

INFORME DE RESULTADOS	
ENSAYO DE TRACCIÓN	
Denominación: RG 18 - 1	
SOLICITADO POR:	Daniela Poalacín Nº 02
PROYECTO DE TESIS:	MEJORAMIENTO DE POLIPROPILENO RECICLADO MEDIANTE LA ADICIÓN DE PET RECICLADO POR PROCESO DE EXTRUSIÓN
DIRECCION:	ESPOCH - FACULTAD DE CIENCIAS
TIPO DE MATERIAL:	POLIPROPILENO
MATERIAL:	PROBETA DE PLÁSTICO
FECHA DE FABRICACIÓN:	2019 - 09
NORMA UTILIZADA:	NTE INEN 2043:95
FECHA DE ENSAYO:	25-sep-19
EQUIPO UTILIZADO: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B	
MARCA: JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD	
SERIE: 7136	CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D CÓD IDENT: M2
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	B 1.9
CARACTERÍSTICA	LÁMINA BLANCA
ESPEJOR [mm]	4.3
ANCHURA [mm]	5.70
SECCION TRANSVERSAL [mm²]	24.51
MODULO DE ELASTICIDAD [MPa]	1.18.E+03
CARGA DE FLUENCIA [N]	360.30
ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa]	14.70
CARGA MAXIMA [N]	456.17
ESFUERZO MAXIMO [MPa]	18.61
PORCENTAJE DE ELONGACION [%]	2.00
OBSERVACIONES:	

Aprobado por:


 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de este documento.

1/1

Dir: Calle Roma N°7 y Padua, Cda Politécnica

Tel: 032924420 - Cel: 0987260955

email: jvinan54@lenmav.com
Riobamba - Ecuador

ANEXO G

INFORME DE RESULTADOS FLEXIÓN



Ing. J. Anibal Viñán B. MsC.

INFORME DE RESULTADOS				
ENSAYO DE FLEXIÓN			Denominación: RF 20 - 1	
			N° 02	
SOLICITADO POR:	Daniela Poalacín			
PROYECTO DE TESIS:	MEJORAMIENTO DE POLIPROPILENO RECICLADO MEDIANTE LA ADICIÓN DE PET RECICLADO POR PROCESO DE EXTRUSIÓN			
DIRECCION:	ESPOCH - FACULTAD DE CIENCIAS			
TIPO DE MATERIAL:	POLIPROPILENO			
MATERIAL:	PROBETAS DE PLASTICO			
FECHA DE FABRICACIÓN:	2019 - 09			
NORMA UTILIZADA:	NTE INEN 2047:96			
FECHA DE ENSAYO:	25-sep-19			
EQUIPO UTILIZADO:	MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B			
MARCA:	JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD			
SERIE:	7136	CERTIFICADO:	LNM-F-2016500064D	CÓD IDENT: M2
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	C1.14	C2.7	C3.14	C4.10
CARACTERISTICA	Placa	Placa	Placa	Placa
ESPESOR [mm]	4.20	3.50	4.00	4.00
ANCHURA [mm]	23.20	23.50	22.60	22.50
SECCION TRANSVERSAL [mm ²]	97.44	82.25	90.40	90.00
MÓD. APARENTE DE ELASTIC. [MPa]	841.92	898.93	2372.35	1323.01
CARGA DE ROTURA [N]	71.54	48.02	64.68	62.72
ESFUERZO EN LA ROTURA [MPa]	26.22	25.02	26.83	26.13
FLECHA EN LA ROTURA [mm]	21.49	5.26	16.37	16.67
OBSERVACIONES:	SE FRACTURÓ LA MUESTRA C3.14			

Aprobado por:

Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de éste documento.

2/2

ANEXO H

INFORME DE RESULTADOS COMPRESIÓN



Ing. J. Anibal Viñán B. MsC.

INFORME DE RESULTADOS				
ENSAYO DE COMPRESIÓN			Denominación: RC 19 - 9	
			N° 01	
SOLICITADO POR:	Daniela Poalacín			
PROYECTO DE TESIS:	MEJORAMIENTO DE POLIPROPILENO RECICLADO MEDIANTE LA ADICIÓN DE PET RECICLADO POR PROCESO DE EXTRUSIÓN			
DIRECCION:	ESPOCH - FACULTAD DE CIENCIAS			
TIPO DE MATERIAL:	POLIPROPILENO			
MATERIAL:	PROBETAS DE PLASTICO			
FECHA DE FABRICACIÓN:	2019 - 09			
NORMA UTILIZADA:	NTE INEN 2047.96			
FECHA DE ENSAYO:	25-sep-19			
EQUIPO UTILIZADO: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B				
MARCA: JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD				
SERIE: 7136	CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D		CÓD IDENT: M2	
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	B1	B2	B3	B4
CARACTERISTICA	Cilindro	Cilindro	Cilindro	Cilindro
DIÁMETRO [mm]	26.2	25.8	26.4	26.7
LONGITUD INICIAL [mm]	77.8	76.1	76.8	74.7
SECCION TRANSVERSAL [mm²]	539.1	522.8	547.4	559.9
MÓD. APARENTE DE ELASTIC. [MPa]	144.31	145.57	140.30	133.42
CARGA MÁXIMA [N]	13560	12420	9600	9700
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	25.15	23.76	17.54	17.32
OBSERVACIONES:				

Aprobado por:


 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de éste documento.

1/2

Dir: Calle Roma N°7 y Padua, Cdla Politécnica

Tel: 032924420 - Cel: 0987260955

email: jvinan54@lenmav.com
Riobamba - Ecuador