



**Diseño y evaluación de una ruta alternativa de reciclaje mecánico para residuos termoplásticos  
provenientes de procesos de lavado y decantado de escamas recicladas posconsumo.**

Cristian Javier Giraldo Muñoz

Trabajo de investigación Para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesor

Diego Hernán Giraldo Vásquez, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería de Materiales  
Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	C. J. Giraldo Muñoz [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	[1] C. J. Giraldo Muñoz, “Diseño y evaluación de una ruta alternativa de reciclaje mecánico para residuos termoplásticos provenientes de procesos de lavado y decantado de escamas recicladas posconsumo.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.



Grupo de Investigación Materiales Poliméricos.



Centro de documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

Primeramente, a Dios y a mi abuela Silvia Rosa Muñoz, que desde lo más alto me hicieron sentir que podía superar cada reto y obstáculo y culminar este proceso.

A mi madre Gladys Elena Muñoz, quién con su esmero y lucha constante permitió que siguiera adelante con este ciclo tan importante de mi vida y que, gracias a ella, pudo llegar a su cierre.

A mis hermanos Liseth Xiomara, Diego Alejandro y Liliana Alejandra por compartir conmigo las pequeñas derrotas enfrentadas y ver en mí aquél ingeniero que puede servirle a la sociedad y a la familia.

A mi asesor Diego Hernán Giraldo por su reiterado apoyo, tolerancia y entrega, por su increíble ética profesional y por sus palabras de aliento en momentos en los que creí no poder con este gran reto.

A mi colega Mario Alejandro Grisales, por su incondicional disposición para apoyarme con la entrega de muestras y demás diligencias en las que no podía desarrollar por motivos personales y laborales.

A mi pareja Mishel Aguirre, por su comprensión y acompañamiento en esta última etapa de mi investigación.

A mi tío Jorge Alfonso Muñoz y a mi abuelo Hernán Daza porque desde su experiencia me enseñaron las dificultades de la vida y de la satisfacción que se siente al cumplir cada uno de mis sueños.

A la Universidad de Antioquia y todo su grupo de docentes, que formaron un profesional con los valores y cualidades necesarias para enfrentar los problemas de la vida diaria.

A la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S. por permitir conocer el problema desarrollado en este proyecto y por su disposición para resolver las dudas que iban surgiendo.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT .....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
JUSTIFICACIÓN.....	18
OBJETIVOS.....	20
A.    Objetivo General: .....	20
B.    Objetivos Específicos .....	20
ASPECTOS GENERALES.....	21
A.    Materiales plásticos .....	21
1.    Polímeros termoplásticos.....	22
2.    Termoplásticos amorfos .....	22
3.    Termoplásticos semicristalinos.....	23
a)    El polipropileno.....	24
b)    El polietileno: .....	24
B.    Reciclaje y reutilización de residuos plásticos .....	25
Reciclaje primario .....	25
Reciclaje secundario o reciclaje mecánico.....	26
Reciclaje terciario: .....	26
Reciclaje cuaternario.....	26
1.    Reciclaje mecánico .....	26
a)    Separación de los residuos plásticos: .....	27
b)    Trituración:.....	27
c)    Lavado:.....	27

d) Secado: .....	27
C. Ensayos térmicos .....	28
1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC). .....	28
2. Termogravimetría (TGA) .....	31
ESTADO DEL ARTE .....	32
A. Reciclaje y reutilización de residuos plásticos .....	32
B. Ensayos térmicos .....	38
EXPERIMENTACIÓN .....	40
A. Muestras y preparación de las muestras .....	40
B. Caracterización .....	44
1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	44
2. Índice de fluidez (MFI).....	45
3. Viscosimetría rotacional .....	45
4. Termogravimetría (TGA) .....	45
5. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	45
6. Extrusión-peletizado de mezclas .....	46
7. Inyección de mezclas peletizadas .....	49
C. Caracterización de material de asiento peletizado .....	52
1. Índice de fluidez .....	52
2. Calcinación .....	52
3. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	53
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	53
A. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	53
B. Índice de fluidez (MFI) .....	55
C. Viscosimetría rotacional.....	58

D. Análisis por termogravimetría (TGA).....	59
E. Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	62
F. Extrusión-peletizado.....	68
G. Inyección de mezclas peletizadas.....	74
H. Caracterización material de asiento peletizado .....	76
1. Índice de fluidez .....	76
2. Calcinación .....	78
3. Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	79
CONCLUSIONES .....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	81

## LISTA DE TABLAS

TABLA I .....	14
TABLA II .....	19
TABLA III .....	23
TABLA IV .....	23
TABLA V .....	46
TABLA VI .....	48
TABLA VII .....	50
TABLA VIII .....	54
TABLA IX .....	55
TABLA X .....	56
TABLA XI .....	73
TABLA XII .....	77
TABLA XIII .....	78
TABLA XIV .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Pirámide para el manejo de los residuos sólidos. Tomada de [2].	16
Fig. 2. Material de asiento proveniente de la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S	17
Fig.3. Estructura monomérica y clasificación del polipropileno. Tomado de [14].	24
Fig.4. Estructura monomérica y clasificación del polietileno de alta densidad. Tomado de [14].	25
Fig.5. Estructura monomérica y clasificación del polietileno de baja densidad. Tomado de [14].	25
Fig.6. Esquema de un equipo DSC. Tomado de [18].	29
Fig.7. Corte transversal de un calorímetro diferencial de barrido de Mettler Toledo, modelo 823e. Tomado de [20].	30
Fig.8. Representación esquemática de un termograma obtenido por DSC de una reacción de primer orden (fusión). Tomado de [19].	30
Fig.9. Representación esquemática de un termograma obtenido por DSC de una reacción de segundo orden (transición vítrea). Tomado de [19].	31
Fig.10. Sistema de lavado propio de la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S. a) recipiente metálico y cuchillas, b) sistema de alimentación de agua y c) jabón sólido.	40
Fig.11. Sistema de etapa de decantado. a) Tanque de decantación con aspas y b) bandas transportadoras.	41
Fig.12. Material precipitado en el tanque de decantación.	42
Fig.13. Sistema de decantación para la obtención del material de asiento.	43
Fig.14. Material de asiento en la superficie del tanque listo para ser separado.	43
Fig.15. Proceso de extrusión-peletizado utilizado para el procesamiento del material de asiento. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.	47
Fig.16. Parámetros de control utilizados para el procesamiento por extrusión del material de asiento, a) velocidad de corte; b) velocidad de rotación del husillo y c) perfil de temperatura. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.	49
Fig.17. Máquina inyectora utilizada para el procesamiento por inyección. Foto tomada en el SENA sede Calatrava- centro de diseño y manufactura del cuero.	51
Fig.18. Parámetros de inyección utilizados para la elaboración de probetas de impacto, a) perfil de temperatura del cilindro; b) cierre del molde y c) unidad de inyección. foto tomada en el SENA sede Calatrava- Centro de Diseño y Manufactura del Cuero.	51

Fig.19. Perfil de temperatura alto en el sistema de inyección. Foto tomada en la empresa JOR S.A.S. .....	52
Fig.20. Espectros FTIR obtenidos para las tres muestras estudiadas. ....	54
Fig.21. Apariencia del parison obtenido para los tres lotes de material de asiento. a) lote 1, b) lote 2 y c) lote 3. ....	57
Fig.22. Apariencia de las materias primas de BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S estudiadas luego de extruidas durante el ensayo MFI. a) polipropileno rojo y b) polipropileno bolas. Tomado de [27]. .....	57
Fig.23. Resumen de resultados de ensayos de viscosimetría para los tres lotes estudiados.....	59
Fig.24. Diagrama TGA y DTGA obtenida para el lote 1. ....	60
Fig.25. Diagrama TGA y DTGA obtenida para el lote 2. ....	61
Fig.26. Diagrama TGA y DTGA obtenida para el lote 3. ....	62
Fig.27. Termograma DSC en la zona de temperatura entre -90 y 0°C obtenida para el lote 1. ....	63
Fig.28. Termograma DSC en la zona de temperatura entre -90 y 0°C obtenida para el lote 2. ....	63
Fig.29. Termograma DSC en la zona de temperatura entre -90 y 0°C obtenida para el lote 3. ....	64
Fig.30. Termograma DSC en la zona de temperatura entre 0 °C y la temperatura máxima de ensayo obtenida para el lote 1. ....	65
Fig.31. Termograma DSC en la zona de temperatura entre 0 °C y la temperatura máxima de ensayo obtenida para el lote 2. ....	65
Fig.32. Termograma DSC en la zona de temperatura entre 0 °C y la temperatura máxima de ensayo obtenida para el lote 3. ....	66
Fig.33. Termograma DSC para la etapa de enfriamiento del lote 1. ....	67
Fig.34. Termograma DSC para la etapa de enfriamiento del lote 2. ....	67
Fig.35. Termograma DSC para la etapa de enfriamiento del lote 3. ....	68
Fig. 36. Tolve de la extrusora alimentada con a) mezcla lote 1, b) mezcla lote 2 y c) mezcla lote 3 del material de asiento con el aditivo compatibilizante. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.....	69
Fig.37. Parisons a la salida del cabezal para a) lote 1, b) lote 2 y c) lote 3. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.....	70
Fig.38. Filtros utilizados para retener impurezas en a) lotes 1 y 2 y b) lote 3. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S .....	70

Fig.39. Material plastificado saliendo por el respirador del husillo. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.....	71
Fig.40. Apariencia de los pellets obtenidos para a) lote 1, b) lote 2, c) lote 3 y d) referencia. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.....	72
Fig.41. Rafia generada por la dificultad de poner a punto el proceso de peletización. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.....	73
Fig.42. Probetas obtenidas por inyección para a) lote 1; b) lote 2 y c) lote 3. ....	74
Fig.43. Probetas obtenidas por inyección con el perfil de temperatura alto.....	75
Fig.44. Humo generado en la boquilla de inyección. Foto tomada en el SENA sede Calatrava-centro de diseño y manufactura del cuero. ....	76
Fig.45. Parisons obtenidos para los pellets de a) lote 1; b) lote 2 y c) lote 3. Foto tomada en el laboratorio de Materiales Cerámicos de la Universidad de Antioquia.....	77
Fig.46. Residuo de calcinación de los pellets de material de asiento. Foto tomada en el laboratorio de fundición de la Universidad de Antioquia .....	78

## RESUMEN

Con el propósito de valorizar los residuos generados por las diferentes etapas del reciclaje mecánico, y ampliar la disponibilidad de la materia prima reciclada posconsumo para los diferentes procesos de transformación, las empresas de este sector buscan alternativas para incluirlos en sus procesos productivos. Este trabajo explora las opciones de reciclaje del material de asiento, el cual fue caracterizado y evaluado bajo una ruta de reciclaje mecánico que permitiera cumplir con las necesidades actuales de las empresas dedicadas a la transformación de resinas plásticas recicladas. Los resultados indicaron que la dificultad en la procesabilidad se encuentra principalmente en el proceso de extrusión que mostró sustancias difíciles de plastificar tales como cargas. Los análisis TGA, DSC y FTIR permitieron identificar los componentes del material de asiento, que se trataba de poliolefinas recicladas tales como polipropileno y polietileno de alta densidad con alto contenido de cargas minerales. Sin embargo, los pellets obtenidos de los tres lotes de material de asiento evaluados mostraron un buen comportamiento al procesarlos mediante moldeo por inyección, sugiriendo que, si se continúa estudiando métodos de mejoramiento del procesamiento por extrusión, es posible implementar una ruta de reciclaje mecánico alternativa que va desde la separación del material de asiento (lavado y decantado) hasta el procesamiento por inyección.

*Palabras clave: material de asiento, procesabilidad, caracterización, poliolefinas, reciclaje*

## ABSTRACT

With the purpose of valuing the waste generated by the different stages of mechanical recycling and expanding the availability of post-consumer recycled raw material for the different transformation processes, companies in this sector are looking for alternatives to include them in their production processes. The material that is decanted to the bottom of the tank during the washing process, which in this work is called settled material and is the material of interest for this work, was characterized and evaluated under a mechanical recycling route that made it possible to meet the current needs of companies dedicated to the transformation of recycled plastic resins. The results indicate that the difficulty in processability is mainly in the extrusion process that showed contamination with substances difficult to plasticize. The TGA, FTIR, and DSC analysis made it possible to identify the components of the settled material, which consisted of recycled polyolefins such as polypropylene and high-density polyethylene with a high content of mineral fillers. However, the pellets obtained from the three batches of seat material evaluated showed good behavior when processed by injection molding, suggesting that, if extrusion processing improvement methods continue to be studied, it is possible to implement an alternative mechanical recycling route ranging from the separation of the settled material (washing and decanting) to injection processing.

Keywords: seat material, processability, characterization, polyolefins, recycling

## INTRODUCCIÓN

El uso de plásticos está en constante crecimiento. Sin embargo, su uso está ligado a un impacto ambiental negativo debido a que luego de que terminan su vida útil pueden llegar a pasar a ser residuos sólidos y potenciales contaminantes. A pesar de los esfuerzos por evitar destinar estos residuos en rellenos sanitarios, todavía se requiere indagar en el campo del reciclaje. Se reporta que hasta 2017 se ha reciclado menos del 10% de todos los polímeros en todo el mundo a lo largo de la historia [1]. Dicha situación es similar en América Latina. La Tabla I presenta una recopilación de varias fuentes de información sobre las tasas de reciclaje en algunos países de América Latina y su correspondiente número de habitantes; en la Tabla se observa que Colombia es el país con la mayor tasa de reciclaje entre los países reportados. Sin embargo, es claro que a nivel general las tasas de reciclaje son inferiores al 20% por lo que aún hay un alto porcentaje que no se aprovecha. La razón principal por la que muchas entidades del gremio del reciclaje de plásticos no han querido enfocarse en dicho 80%, es porque resulta aún más complejo realizarle procesos de reciclaje mecánico a los mencionados residuos con las tecnologías a las que se puede acceder de acuerdo con los recursos con los que cuenta cada entidad, por lo que les resulta más práctico enfocar sus esfuerzos en el 20% que se recicla actualmente.

El papel que desempeñan los termoplásticos en la sostenibilidad ambiental está directamente relacionado con el cierre del ciclo de vida de todos los productos diseñados a partir de estos materiales [2]. Se han implementado alternativas para darle frente a esta problemática tales como el reciclaje, la biodegradación cuando las propiedades químicas del material lo permiten y la recuperación energética. Impulsar a las generaciones futuras en el uso responsable de los plásticos es muy importante, ya que los plásticos aportan a la sociedad una mejora en la calidad de vida debido a su gran versatilidad para ser utilizados en sectores como la salud, empaques de alimentos y embalaje de estos, construcción liviana, entre otros. En América Latina, el termoplástico con mayor tasa de reciclaje es el polietilentereftalato (PET), con una tasa de reciclaje de 60% en México, 31% en Estados Unidos, 42% en Brasil, 40% en Canadá y aproximadamente entre 25 y 30% en Colombia [2]. Los otros termoplásticos presentan tasas de reciclaje más bajas y una parte

de ellos terminan depositados en vertederos. Lo anterior muestra que hay grandes oportunidades para el reciclaje de polímeros termoplásticos, ya que actualmente hay aún un volumen importante de residuos termoplásticos que no son procesados adecuadamente debido a que requieren procesos mejorados respecto a los que vienen usándose de manera convencional, tal como se mencionó anteriormente.

TABLA I  
ESTADO DE RESIDUOS EN AMÉRICA LATINA

País	Población total (millones) [3]	Producción total de residuos (millones ton/año) [4]	Producción de residuos per cápita (Kg/año)	Porcentaje de residuos plásticos generados [5]	Tasas de reciclaje (%) [6]
Argentina	44.5	13.7	307.8	14.36	6
Bolivia	11.4	1.8	158.9	6.15	4.5
Brasil	209.5	62.7	299.5	14.94	0.8
Chile	18.7	7.9	420.7	9.4	10
Colombia	49.6	11.3	227.6	10.67	19.5
Ecuador	17.1	3.8	222.5	8.05	N/A
Guyana	0.8	0.4	542	14.4	N/A
Paraguay	6.9	2.3	323.9	5.63	N/A
Perú	32	8.1	251.6	6.22	N/A
Surinam	0.6	0.2	295.3	11	N/A
Uruguay	3.4	1.3	367.1	12	N/A
Venezuela	28.9	9.2	318.3	N/A	N/A

Nota: Tomado de [7].

Otro aspecto importante que en algunas ocasiones dificulta el reciclaje, especialmente el de tipo mecánico, son los residuos que contienen aditivos. Las piezas plásticas que se usan diariamente, además de la resina polimérica, contienen una combinación de aditivos absolutamente necesarios para facilitar su procesamiento y garantizar las propiedades del producto final [8]. Además, la demanda de residuos termoplásticos recuperados implica la utilización de diversos tipos de aditivos que se incorporan para mejorar cada una de las etapas de reprocesamiento. Citando un ejemplo, en el caso de los materiales termoplásticos es muy común el uso de aditivos reforzantes

como el carbonato de calcio que mejoran las propiedades mecánicas del producto final. Cuando se realiza el proceso de reciclaje mecánico a residuos sólidos posconsumo, normalmente se realiza un proceso de tratamiento de la materia prima que consiste en trituración, lavado, decantado, secado y finalmente el procesamiento que permite la conformación del producto (extrusión, inyección, etc.). El proceso de trituración se realiza con el objetivo de obtener un tamaño de partícula promedio que permita el fácil procesamiento del material; el lavado se realiza para eliminar olores, suciedad y pantano; el decantado aprovecha la diferencia de densidades de los diferentes polímeros para recuperar el material de interés (normalmente se lleva a cabo en un tanque con agua como medio de separación); el secado permite eliminar el agua absorbida durante los procesos de lavado y decantado. Durante la etapa de decantado se genera lo que se denomina material de asiento, que es un tipo de residuo que consta de pantano, metales y una mezcla de polímeros; las cargas reforzantes que contienen incrementan su densidad y por ello tienden a asentarse en el fondo de los recipientes. Este material de asiento no es fácil de procesar, por lo que algunas empresas lo desechan y otras realizan esfuerzos para tratar de recuperarlo y darle valor agregado a este tipo de desechos.

A pesar de que se han destinado esfuerzos y recursos para abordar el cierre del ciclo de vida de los residuos termoplásticos, aún falta involucrar residuos que salen de los tratamientos de materiales posconsumo, de los cuales no se tiene un uso definido y terminan siendo desechados. La manera en que deben gestionarse estos residuos sólidos es teniendo en cuenta la pirámide que se muestra en la Figura 1. En esta pirámide, la base representa las operaciones menos sostenibles y la punta, las de mayor sostenibilidad. La recuperación de energía a partir de los desechos termoplásticos provenientes de los residuos sólidos municipales (RSM), es una alternativa mundialmente empleada. El poder calorífico del polietileno, del polipropileno y del poliestireno, considerados los polímeros más representativos en la composición de los RSM, es comparable con el poder calorífico de los aceites combustibles. Esto indica claramente el potencial para la utilización de los residuos termoplásticos en la recuperación de energía. Sin embargo, de acuerdo con la Figura 1, esta alternativa vale la pena considerarla solo cuando se han agotado los esfuerzos en reducción en la fuente, reutilización y reciclaje [2], por lo que el reciclaje químico, como la pirólisis, es una alternativa que no será abordada en este trabajo.

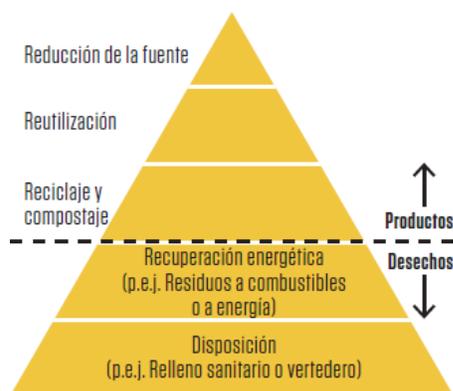


Fig. 1. Pirámide para el manejo de los residuos sólidos. Tomada de [2].

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los termoplásticos reciclados posconsumo han sido objeto de diversos estudios, debido a las implicaciones legales y ambientales que ha generado desde hace décadas. El concepto de economía circular y desarrollo sostenible es la base en la que se sustentan empresas medianas y pequeñas de reciclaje. Sin embargo, el aprovechamiento de este tipo de residuos requiere de una serie de procesos que implican el uso de tecnologías que no son accesibles para la mayoría de estas empresas. El problema radica en que no ha sido posible aprovechar completamente los residuos termoplásticos posconsumo por medio de reciclaje mecánico, es decir, las materias primas que se someten a procesos de lavado y decantado para poder ser procesadas generan otros residuos que no están siendo aprovechados debido a su complejidad, por lo que resultan siendo desechados. Se debe tener en cuenta que tanto empresas formales como informales del sector del reciclaje son muy celosas con sus procesos internos por lo que ha sido complejo acceder a información que sirva de punto de partida para este trabajo.

Sin embargo, BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S., una pequeña empresa del gremio del reciclaje de termoplásticos permitió acceder a la información más detallada del problema mencionado. En una entrevista realizada con el señor Julián Marín, jefe de producción de la compañía, no solo fue posible identificar el problema, sino también las cantidades semanales generadas en condiciones de productividad normal y lo que han hecho hasta el momento para tratar de evitar desechar este residuo. En la entrevista, el señor Marín afirmó: “nosotros como empresa

dedicada al reciclaje de termoplásticos hemos estado dispuestos a recibir todo tipo de residuos de ese material, desde posindustrial hasta posconsumo, ampliando la posibilidad de obtener materias primas para desarrollar las actividades competentes a nuestra razón social. Nuestro fuerte son los residuos termoplásticos posconsumo, por lo que contamos con las herramientas necesarias para triturar, lavar, decantar y secar la materia prima que nos proveen para poderla extruir; es por eso que la demanda de residuos provenientes de los procesos de lavado o asiento cada vez es mayor y hemos buscado la manera de procesar por extrusión este material y no ha sido posible, ya que en el intento se requiere invertir el doble de esfuerzos tanto del personal como de consumo de energía, repetir el proceso de extrusión, ya que el material extruido debe ser nuevamente mezclado en proporciones controladas con materiales que tienen las condiciones para ser extruidos con normalidad y poder asignarle un valor agregado a este residuo, pero es un ejercicio que es poco rentable”. La Figura 2 es una fotografía tomada en la planta de BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S. en la cual se muestra el material llamado asiento, el cual es el material de interés en esta investigación.



Fig. 2. Material de asiento proveniente de la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S

Con el estudio propuesto en este documento se pretende buscar una metodología para aprovechar los residuos provenientes de los procesos de tratamiento de materiales termoplásticos posconsumo, evaluando la viabilidad de esa metodología para ser implementada a nivel industrial partiendo de la pirámide de las operaciones más sostenibles como el reciclaje mecánico (en el que se busca obtener parámetros y aditivos que permitan el fácil procesamiento de los mismos),

haciendo uso de métodos termo mecánicos como la extrusión que favorezcan la aplicabilidad de dichos residuos termoplásticos en la industria.

## JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la industria del plástico influye directamente sobre otros sectores productivos, ya que la innovación en materias primas y tecnologías genera avances para sectores como el aeroespacial, el médico, generación de energía, construcción, marítimo, automoción, o textil. Por ser materiales livianos, duraderos, versátiles, permite ahorros considerables de energía en los sectores industriales mencionados. Sin embargo, según el Programa Medioambiental de Naciones Unidas, entre el 22% y el 43% de los materiales termoplásticos empleados terminan en vertederos [2].

De igual manera, en Colombia la demanda en la producción de termoplásticos está en constante crecimiento lo que provoca consecuentemente un incremento en la generación de residuos termoplásticos. Con el impulso que debe tomar la economía circular, las empresas tanto formales como informales que se dedican a las diferentes actividades de la cadena productiva del plástico deben aportar al crecimiento del concepto de sostenibilidad. La Tabla II muestra una recopilación de las diferentes razones sociales de empresas dedicadas al reciclaje de termoplásticos tomado del Directorio Colombiano de Reciclaje de Residuos Plásticos publicado por ACOPLÁSTICOS (2019) [9].

Se debe tener en cuenta que el anterior registro es solo una referencia para identificar algunas empresas que desempeñan un papel de acuerdo con las funciones que les compete en el sector de reciclaje de termoplásticos, pero las cifras deben ser mayores ya que hay un gran número de entidades que no se encuentran registradas en este directorio.

TABLA II  
EMPRESAS DEDICADAS AL SECTOR DEL RECICLAJE DE TERMOPLÁSTICOS [9]

	Empresas que recolectan, compran, seleccionan, clasifican, empacan, transportan o comercializan residuos termoplásticos	Empresas que adquieren residuos termoplásticos seleccionados, prestan servicio a terceros o comercializan materia prima recuperada o producto terminado	Empresas transformadoras de residuos termoplásticos
Total, de empresas en Colombia	89	29	38
Total, de empresas ubicadas en Medellín y el área Metropolitana incluyendo el municipio de Rionegro	14	7	7
Porcentaje de empresas ubicadas en Medellín y el área Metropolitana incluyendo el municipio de Rionegro	15,7%	24,2%	18,4%
Total, de empresas en Colombia	89	29	38

BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S. pertenece al grupo de empresas que adquiere residuos termoplásticos seleccionados, presta servicio a terceros o comercializa materia prima recuperada o producto terminado. Según información suministrada por Julián Marín, jefe de producción de la compañía, en un período de productividad normal se generan mensualmente hasta 3 toneladas de residuos termoplásticos provenientes de los procesos de lavado y decantado de residuos termoplásticos posconsumo, lo que considera una cantidad bastante considerable y por lo tanto es necesario buscar la manera de poder aprovecharlos. A pesar de no tener disponible información

de otras empresas dedicadas a este tipo de labores, Julián Marín aclara que este tipo de problemas son un inconveniente para todo el sector del reciclaje.

Por otra parte, el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y el Caucho (ICIPC) cuenta desde el año 2019 con un programa llamado “valorización de residuos”, en el cual brindan servicio a empresas que necesitan caracterizar cualquier tipo de residuos termoplásticos por medio de pruebas físicas y reológicas, pero no tienen una línea de investigación dedicada a los materiales de asiento, ya que los ensayos y el material de interés surge de la necesidad que cada empresa en particular presente y a la fecha no se conocen reportes de estudios sobre materiales de asiento.

Es importante entonces realizar una investigación enfocada en el aprovechamiento de residuos termoplásticos que aún no se han abordado con profundidad, como es el caso de los materiales de asiento provenientes de los procesos de lavado, obteniendo resultados que puedan ser usados por medianas y pequeñas empresas del sector del reciclaje de termoplásticos.

## OBJETIVOS

### A. *Objetivo General:*

Diseñar, evaluar e implementar una ruta de reciclaje mecánico para el aprovechamiento de material de asiento proveniente de procesos de lavado y decantado de residuos termoplásticos posconsumo.

### B. *Objetivos Específicos*

Obtener una mezcla de los residuos termoplásticos de interés con las proporciones adecuadas de aditivos que permitan su procesamiento.

Comparar la procesabilidad de un material reciclado del portafolio comercial de una empresa de la región con la de una mezcla de material de asiento con una ayuda proceso mediante extrusión-peletizado e inyección, para validar la viabilidad de la mezcla desarrollada.

Identificar el efecto de los aditivos considerados en el estudio sobre la procesabilidad del material de asiento, incluyendo una caracterización mediante análisis térmico, espectroscópico y reológico para entender la procesabilidad de las mezclas.

## ASPECTOS GENERALES

### A. *Materiales plásticos*

La American Society for Testing Materials [10] define como plástico a cualquier material de un extenso y variado grupo que contiene como elemento esencial una sustancia orgánica de gran peso molecular, siendo sólida en su estado final; ha tenido o puede haber tenido en alguna etapa de su manufactura (fundido, cilindrado, prensado, estirado, moldeado, etc.) diferentes formas de fluidificación, mediante la aplicación de calor o presión. Los plásticos son compuestos constituidos por moléculas que forman estructuras muy resistentes, que permite ser moldeados mediante presión y calor.

Los plásticos se caracterizan por una relación resistencia/densidad alta, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes, tienen baja conductividad eléctrica y térmica, y no son adecuados para utilizarse a temperaturas elevadas. Los plásticos son producidos mediante un proceso conocido como polimerización, ya sea por adición, por condensación, o por etapas, es decir, creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico [11].

## 1. *Polímeros termoplásticos*

Noriega, Naranjo y Correa [12] definen los polímeros termoplásticos como materiales cuyas macromoléculas son lineales, siendo estas ramificadas y no ramificadas, es decir, son fundibles y deformables plásticamente.

Las fuerzas intermoleculares o fuerzas secundarias son las encargadas de la unión de las cadenas. Dependiendo las condiciones de carga y temperatura las fuerzas de unión pueden alcanzar a evitar el desplazamiento de las moléculas respecto a otras. De esta forma, pueden sufrir deformación irreversible. En presencia de moléculas solventes estas cadenas se dejan separar con facilidad. Este fenómeno es conocido como *hinchamiento* y genera un aumento del volumen y un ablandamiento del material.

Los termoplásticos dependiendo de su organización macromolecular pueden ser frágiles o tenaces a temperaturas normales. Sin embargo, es posible ablandarlos y fundirlos un número determinado de veces sin sufrir cambios químicos considerables, si se garantizan las condiciones térmicas para su procesamiento. Las dos características mencionadas de este tipo de polímeros (fundibles y solubles o hinchables) son las que permiten el procesamiento y someterlos a los diferentes procesos de transformación.

## 2. *Termoplásticos amorfos*

Se caracterizan porque sus moléculas son totalmente desordenadas, lo que les da transparencia y fragilidad en condiciones normales. Los segmentos de cadena se ven impedidos para organizarse debido a su estructura macromolecular. Sus cadenas adquieren movilidad y sus propiedades mecánicas presentan un pequeño cambio cuando son calentados hasta cierta temperatura. Cuando este tipo de materiales se ablanda adquiere gran elasticidad. Algunos termoplásticos amorfos se muestran en la Tabla III.

TABLA III  
TERMOPLÁSTICOS AMORFOS

Nombre técnico	Abreviatura
Poliestireno	PS
Poliestireno butadieno	SB
Acrilonitrilo-butadieno-estireno	ABS
Estireno acrilonitrilo	SAN
Policloruro de vinilo	PVC
Polimetilmetacrilato	PMMA
Acetato de celulosa	CA
Acetato butirato de celulosa	CAB

Nota: Tomado de [12].

### 3. *Termoplásticos semicristalinos*

Son termoplásticos con estructura molecular parcialmente ordenada. Se caracterizan por tener buena tenacidad, maleabilidad, buena rigidez y alta resistencia mecánica. Además, son opacos debido a la dispersión de la luz por los cristaloides. Gracias a su fuerte unión secundaria entre las macromoléculas de los cristaloides poseen buena resistencia mecánica, debido a la pequeña distancia intermolecular entre dichas estructuras estas alcanzan altos valores máximos de fuerzas de unión. Algunos termoplásticos semicristalinos se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV  
TERMOPLÁSTICOS SEMICRISTALINOS

Nombre técnico	Abreviatura
Polietileno	PE
Polipropileno	PP
Poliamida	PA
Polietilentereftalato	PET
Polibutilentereftalato	PBT
Policarbonato	PC
Politetrafluoretileno	PTFE
Poliuretano	PUR

Nota: Tomado de [12].

a) *El polipropileno:*

El polipropileno es una poliolefina que se produce de la polimerización del monómero propileno. Este polímero también puede ser copolimerizado con etileno para formar los polímeros random que presentan mejor transparencia y brillo y los copolímeros de impacto que tienen buena resistencia al impacto a temperatura ambiente. En general, el polipropileno posee una alta cristalinidad, por lo que sus cadenas son compactas lo que genera una resina de alta calidad. Otras propiedades importantes son su dureza, resistencia al impacto, resistencia a la abrasión y que no es tóxico [13].

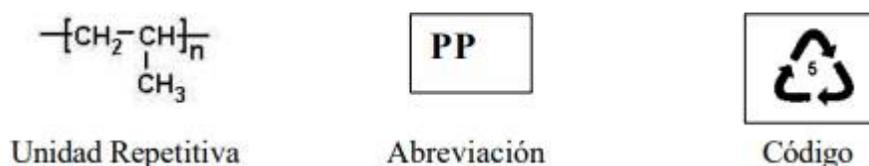


Fig.3. Estructura monomérica y clasificación del polipropileno. Tomado de [14].

b) *El polietileno:*

Es uno de los polímeros más usados a nivel industrial y su crecimiento es notorio año tras año, ya que tiene propiedades que lo hacen favorito en muchas aplicaciones y su manufactura y procesamiento son relativamente económicos. El polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico, semicristalinos, en el cual las cadenas que lo constituyen tienen muy pocas cadenas laterales que pueden estar mejor empaquetadas, lo que hace que el polímero sea más rígido. Dependiendo del peso molecular, de la cantidad de comonómero presente y los procesos térmicos aplicados su grado de cristalinidad puede variar. Su densidad está entre 0,960 y 0,965 g/mL [14].

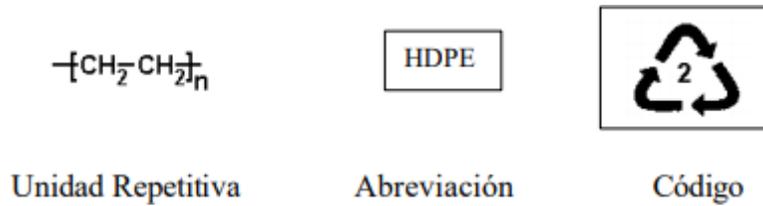


Fig.4. Estructura monomérica y clasificación del polietileno de alta densidad. Tomado de [14].

El polietileno de baja densidad (LDPE por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico altamente ramificado de cadena larga y su densidad se encuentra entre 0,915 a 0,925 g/mL. Este tipo de plásticos funden a 106 y 116°C.

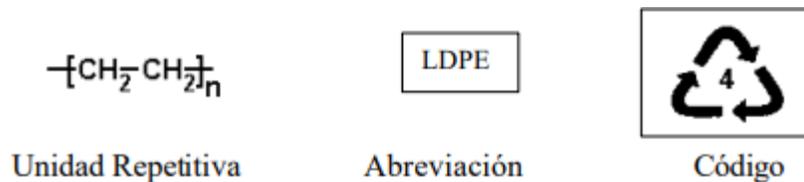


Fig.5. Estructura monomérica y clasificación del polietileno de baja densidad. Tomado de [14].

### B. *Reciclaje y reutilización de residuos plásticos*

El reciclaje es una de las rutas más utilizadas para el aprovechamiento de los residuos sólidos en general, especialmente en plásticos, desde los años setenta algunos países han tomado la iniciativa de incinerar los residuos plásticos y hoy en día se han puesto en práctica diferentes métodos de cierre del ciclo de estos materiales [15].

Existen 4 tipos de reciclaje de plásticos, que se usan de acuerdo con el estado de contaminación de los residuos plásticos, su viabilidad técnica y económica:

*Reciclaje primario:* se usa cuando los materiales están limpios y homogéneos, separándolos de una manera cuidadosa de acuerdo con el tipo de termoplástico. Luego de la limpieza, se tritura y se procesa de nuevo y así se convierte en nueva materia prima del mismo material de partida.

*Reciclaje secundario o reciclaje mecánico:* en este caso no es posible obtener el material original, sino uno con menores propiedades. Normalmente, estos materiales son llevados a procesos que permiten tener las condiciones de limpieza y descontaminación para ser nuevamente procesados.

*Reciclaje terciario:* el polímero es sometido a degradación para recuperar los compuestos químicos de partida y combustibles. A diferencia de los anteriores métodos, este tipo de reciclaje exige tanto un cambio químico como físico. En este sentido, las cadenas poliméricas sufren rompimiento y se convierten en pequeños hidrocarburos o monómeros. En esta clasificación se encuentra la pirólisis y la gasificación.

*Reciclaje cuaternario:* en este tipo de reciclaje se utiliza la energía térmica liberada de los procesos de calentamiento del plástico, lo que quiere decir que el plástico es utilizado como fuente de energía [11].

### 1. *Reciclaje mecánico*

El reciclaje mecánico es uno de los métodos físicos en el cual materiales posconsumo son transformados en materias primas secundarias que permiten ser utilizados en algunas aplicaciones como sustitutos de los materiales vírgenes. El reciclaje mecánico es principalmente aplicado a polímeros termoplásticos como el polipropileno, el polietileno, el poliestireno y el policloruro de vinilo [16].

Debido a las características fisicoquímicas de los polímeros termoplásticos es posible someterlos a procesos térmicos varias veces, pero van perdiendo sus propiedades mecánicas con cada ciclo de procesamiento debido a que sufren degradación. Esta disminución en las propiedades hace que los plásticos reciclados sean empleados en productos que requieran menos exigencias mecánicas. Cada polímero termoplástico debe ser sometidos a diferentes condiciones térmicas que aseguren una materia prima de calidad y pueda ser llevado al mercado [17].

*a) Separación de los residuos plásticos:*

Se realiza para separar los residuos plásticos posconsumo, especialmente aquellos que han estado en contacto con sustancias tóxicas que puedan afectar el ambiente microbiológico teniendo en cuenta la normatividad ambiental competente. El proceso de separación consiste normalmente en clasificar la materia prima de acuerdo con su color y tipo, ya que estos residuos pueden estar acompañados de otros materiales orgánicos y/o inorgánicos como papel, metal, etiquetas, que deben ser retirados para continuar con el proceso de reciclaje mecánico [15].

*b) Trituración:*

Es el proceso por el cual se reduce el tamaño de las partículas de los residuos con el propósito de poder ser introducidos en el sistema de alimentación de los procesos de transformación. Se utilizan equipos de molienda o trituración para plásticos dependiendo del termoplástico que va a ser sometido a este método. Luego de este proceso, se obtiene un material con una geometría de escamas con un tamaño aproximado de 1 a 2 centímetros [15].

*c) Lavado:*

En esta etapa se elimina la suciedad y contaminación de las escamas. Normalmente consiste de dos etapas: en la primera las escamas son introducidas a un tanque con cuchillas en el fondo lo que permite con la ayuda de agua y en algunas ocasiones jabón o detergente eliminar pantano, pigmentos, aceites. En el segundo, se aprovecha las diferentes densidades para hacer flotar en un tanque con agua el material de interés y los contaminantes se precipitan.

*d) Secado:*

Debido al proceso de lavado, las escamas presentan un alto contenido de humedad por lo que es necesario realizar un secado a estas escamas. Algunas empresas utilizan hornos o centrifugas teniendo una temperatura que no afecte el material y pueda ser utilizado fácilmente en procesos de

extrusión o inyección. Al final de todas estas etapas, se realiza un proceso de peletizado para obtener materia prima útil para la fabricación de producto terminado [15].

### C. Ensayos térmicos

#### 1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

La calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés) se basa en la medición de un flujo de calor que debe suministrarse a una velocidad constante, independientemente a una muestra M y a una referencia estándar R, para que ambas sigan el mismo programa de temperatura  $T_p$  [18]. La transmisión de calor debe ser instantánea por lo cual se trabaja con muestras muy pequeñas que son colocadas en crisoles cerrados herméticamente, para impedir que se produzcan cambios de humedad durante el proceso. Es muy importante que el contenido de agua de las muestras permanezca constante durante la determinación de una transición, puesto que la cantidad de agua tiene una influencia sobre la temperatura a la cual se produce dicho efecto térmico [19].

En la figura 6 se observa un esquema típico de un equipo DSC. Los crisoles que contienen, respectivamente, la muestra y la referencia, están equipados con sensores para la medida de la temperatura y resistencias de calentamiento independientes. Un sistema de control permite que las temperaturas instantáneas de cada crisol ( $T_M$  y  $T_R$ ) se midan y se comparen continuamente con el valor de temperatura programado  $T_p$ . El sistema trabaja de modo tal que la energía suministrada en cada instante, por cada resistencia de calentamiento, sea proporcional a la diferencia de temperaturas entre cada crisol y la temperatura programada, de acuerdo con lo siguiente:

$$E_M = K_M(T_M - T_p) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$E_R = K_R(T_R - T_p) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$E_M$  y  $E_R$  son las energías suministradas por las resistencias, mientras que  $K_M$  y  $K_R$  son constantes del sistema, que dependen de las características de cada material, la muestra y la referencia [18].

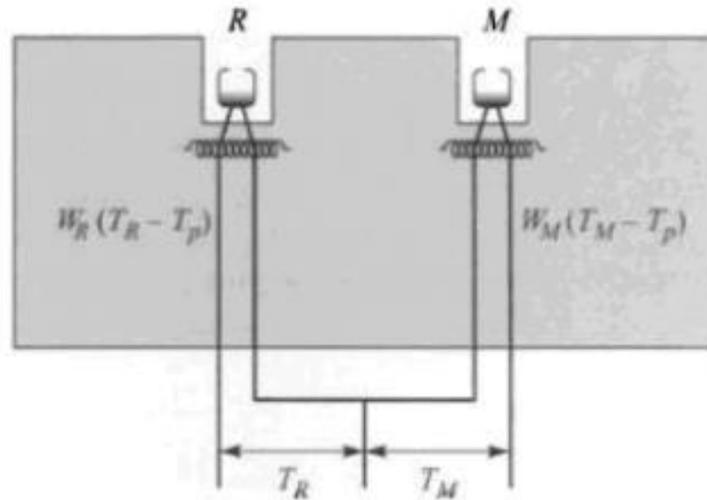


Fig.6. Esquema de un equipo DSC. Tomado de [18].

A cada instante, la diferencia de energía  $\Delta E$ , requerida para mantener la temperatura de las dos celdas a la temperatura programada, es representada en un termograma como una función de la temperatura programada,  $T_p$ . En la figura 7 se presenta un corte transversal de un equipo DSC utilizado en laboratorio.

Esta técnica se utiliza para identificar cambios endotérmicos o exotérmicos que ocurren durante una medida dinámica en función de la temperatura. Estos cambios son denominados transiciones térmicas o eventos térmicos. Las transiciones térmicas de primer orden (figura 8) producen picos y las de segundo orden (figura 9) producen saltos en el flujo de calor.

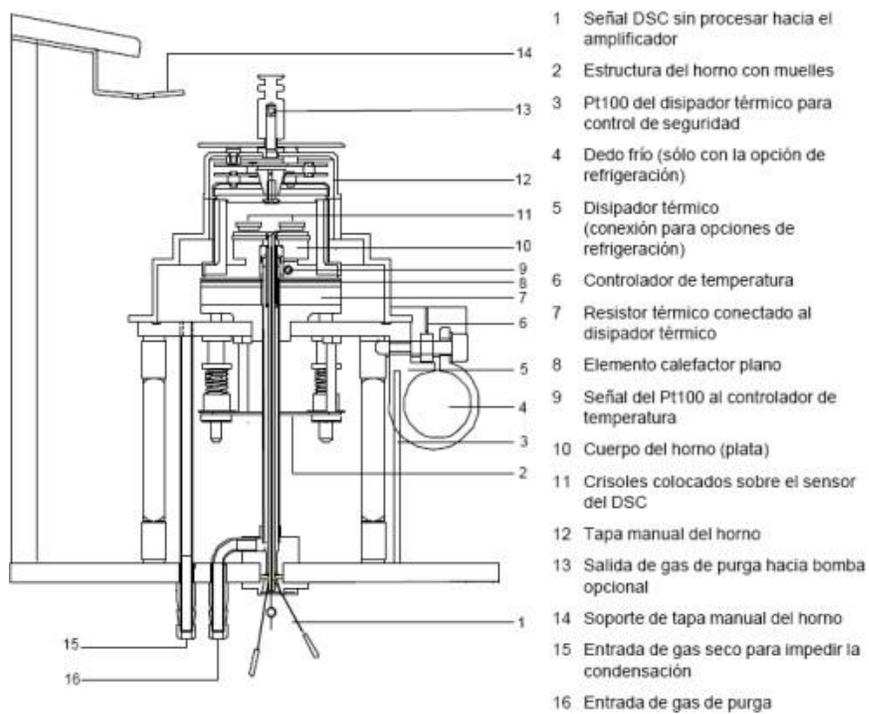


Fig.7. Corte transversal de un calorímetro diferencial de barrido de Mettler Toledo, modelo 823e. Tomado de [20].

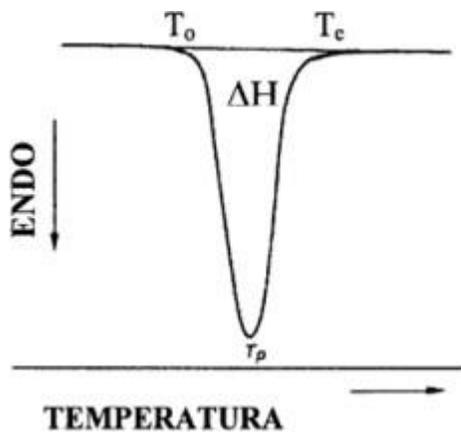


Fig.8. Representación esquemática de un termograma obtenido por DSC de una reacción de primer orden (fusión). Tomado de [19].

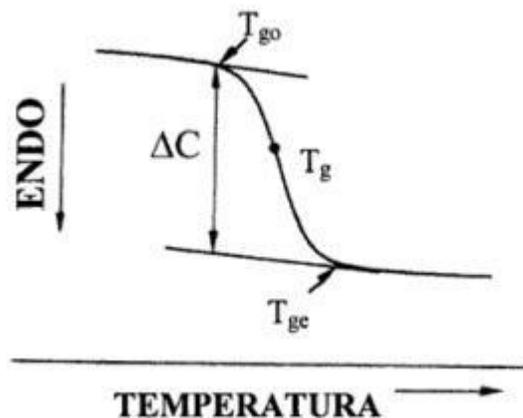


Fig.9. Representación esquemática de un termograma obtenido por DSC de una reacción de segundo orden (transición vítrea). Tomado de [19].

## 2. Termogravimetría (TGA)

TGA es una técnica útil y precisa para la medición de la estabilidad térmica de materiales, incluidos los polímeros. En este método, los cambios en el peso de una muestra se miden mientras se aumenta su temperatura. La humedad y el contenido volátil de una muestra se pueden medir mediante TGA. El aparato consiste básicamente en una báscula de alta sensibilidad para medir cambios de peso y un horno programable para controlar la tasa de calentamiento de la muestra. El equilibrio se encuentra por encima del horno y está térmicamente aislado del calor. Un cable colgante de alta precisión se suspende desde la balanza hasta el interior del horno. Al final del cable colgante se encuentra el plato de muestra, cuya posición debe ser reproducible. El equilibrio debe aislarse de los efectos térmicos (p. Ej., Mediante el uso de una cámara termostatazada) para maximizar la sensibilidad, exactitud y precisión del pesaje. La adición de un espectrómetro infrarrojo a TGA permite el análisis e identificación de los gases generados por la degradación de la muestra.

El aparato de TGA está equipado con un microhorno, que se puede enfriar rápidamente. El elemento calefactor está hecho de platino (fiable hasta 1000 °C). Un horno externo con un elemento

calefactor hecho de una aleación de platino y rodio al 30% puede extender el rango de temperatura a 1500 ° C.

Un aparato moderno suele estar equipado con una computadora que puede calcular la fracción o el porcentaje de pérdida de peso [21].

## ESTADO DEL ARTE

### A. *Reciclaje y reutilización de residuos plásticos*

El reciclaje de residuos plásticos es una práctica que viene en constante crecimiento no solo a nivel industrial sino también en el campo de la investigación. Se han realizado una gran variedad de estudios para abordar el reciclaje mecánico de algunos polímeros termoplásticos. Por ejemplo, en [22] proporcionaron una descripción general completa de los esfuerzos de investigación recientes y las tendencias industriales en el reciclaje de poliolefinas (específicamente PP y PE), incentivados debido a que la degradación inducida durante el proceso de reciclaje, así como la degradación provocada por procesos termo mecánicos (extrusión, moldeo por inyección, etc.) u otros procesos, típicamente conduce a cambios irreversibles en las propiedades fisicoquímicas y la estructura del material. Por lo cual, es importante comprender la magnitud y los mecanismos de deterioro de la propiedad durante el proceso de reciclaje a través de métodos químicos, termo mecánicos, de reutilización o de incineración mientras se analizan las posibles utilidades, aplicaciones y soluciones para los desechos de poliolefinas acumulados a nivel mundial existentes.

Los autores concluyeron que uno de los desafíos importantes para la explotación total de polímeros reciclados es lograr el nivel de propiedades para los vírgenes en un enfoque rentable. Por lo que sugieren que es importante asegurarse que las propiedades finales del material sean suficiente para una aplicación adecuada y también económica. Además, que otro desafío al que se enfrenta el reciclaje es el costo y la dificultad de clasificar y separar componentes plásticos complejos (mezclas de polímeros, plásticos multicapa con cada capa compuesta de diferentes tipos de polímeros o incluso capas de base metálica, etc.) en comparación con su contraparte de plástico virgen. Por lo que sugieren cómo diseñar para la etapa final de la vida útil del material cuando los

materiales, más específicamente los polímeros, se vuelven cada vez más complejos. También, que el enorme potencial de las poliolefinas recicladas se ha puesto de manifiesto en diferentes campos de la investigación y la industria, como la automoción, los aparatos electrónicos, la construcción, los compuestos de madera y plástico y los combustibles. Sin embargo, que otras aplicaciones de las poliolefinas recicladas, como el envasado de alimentos no se ha estudiado en profundidad para obtener un protocolo adecuado antes de la comercialización.

Otro ejemplo es el trabajo realizado por Kosior y Mitchell [23] los cuales analizaron la producción de plástico y el reciclaje de este desde un punto de vista industrial. Además, ofrecieron descripciones generales de la producción mundial de plástico y la gestión de residuos plásticos. También, el reciclaje de plástico lo analizaron en profundidad desde el punto de vista de la recolección, las instalaciones de reciclaje, los avances actuales, los problemas económicos y los desafíos y oportunidades para mejorar el reciclaje de plástico.

Los autores concluyeron que el progreso de la producción de polímeros, los desarrollos de envases y las innovaciones en el reciclaje estarán estrechamente vinculados en un futuro próximo, ya que es cada vez más importante reducir la cantidad de plásticos residuales que se desechan después de un solo uso.

Otros enfoques sobre el reciclaje mecánico también se han abordado, es el caso del trabajo realizado por [24] en su proyecto de grado quien analizó el proceso de elaboración de madera plástica a base de mezclas de polipropileno y polietileno reciclados en la empresa Maderpol S.A.S para normalizar la producción de perfiles de madera plástica bajo fichas técnicas que especificaran sus propiedades mecánicas de mayor relevancia para su uso. Además, evaluó las propiedades mecánicas de las probetas extruidas en la empresa Maderpol S.A.S bajo normas técnicas internacionales en pruebas de flexión. Se concluyó que en el estudio de compatibilidad de los materiales de insumos de la madera plástica utilizada en la empresa la mezcla entre el PP y el PE reciclados era muy favorable para sus productos básicamente por ser polímeros en donde en su mezcla aún sin ser miscibles se obtiene un material con la combinación de las propiedades mecánicas de los dos materiales como son la alta resistencia mecánica del PP y la suficiente flexibilidad del PE. También, se recomendó a la empresa Maderpol S.A.S estandarizar los procesos

con un enfoque técnico e ingenieril, ya que se observó que no hay estándares de variables como temperatura, presión y tiempos en el proceso de extrusión de los perfiles de madera plástica.

Un ejemplo adicional es el trabajo de París y González [25] quienes presentaron un documento referencia para los materiales plásticos provenientes de la industria bananera (materiales reciclados posconsumo como polietileno de baja densidad y polipropileno con cargas de carbonato de calcio), los cuales se emplean para la elaboración de madera plástica. Además, presentaron el estudio y caracterización de dicha materia prima, para identificar y definir los componentes, mezclas y proporciones para obtener productos con buenas propiedades.

Por su parte, en [26] se exploraron varios enfoques para reciclar los residuos plásticos en nuevos productos con el fin en encontrar una forma eficaz de gestionar estos residuos y mejorar la sostenibilidad del medio ambiente. Además, presentaron la amenaza crítica de la presencia de desechos plásticos en el medio marino. También, discutieron la limitación del uso de residuos plásticos para aplicaciones de construcción junto con las perspectivas. Los autores concluyeron que el uso de desechos plásticos para aplicaciones de construcción mejorará significativamente la sustentabilidad del medio ambiente y también servirá como una fuente confiable de materiales para fines de construcción. Además, que el uso de desechos plásticos reciclados como componentes en compuestos cementosos era el más beneficioso, ya que podía usarse para reemplazar todos los componentes sólidos del compuesto.

En un estudio realizado en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S. [27] se identificaron las condiciones adecuadas de procesamiento por extrusión e inyección a dos materias primas utilizadas para los procesos productivos de la compañía (dos polipropilenos posconsumos provenientes de distintos proveedores). En dicha investigación se concluyó que ambas materias primas permiten ser procesadas bajo las condiciones habituales de procesamiento manejadas en la industria.

Por otro lado, el reciclaje mecánico se vuelve un poco más complejo cuando se trata de mezclas de varios polímeros. La necesidad de promover el uso de polímeros multifuncionales ha obligado a los diferentes entes del gremio a generar mezclas comerciales de polímeros. Desde el

punto de vista económico se han encontrado ventajas. Sin embargo, cuando se trata de valorizar estos residuos por medio del reciclaje se encuentran grandes dificultades. Cabe resaltar el esfuerzo que se ha hecho durante los últimos años para encontrar una solución que permita aprovechar el potencial de estos materiales no solo cuando se encuentran en servicio sino también cuando han finalizado su vida útil. Dorigato [28] en una revisión bibliográfica analizó las potencialidades del reciclaje de mezclas de polímeros en el cual menciona los problemas y las definiciones del reciclaje de plásticos, informando algunos conceptos básicos sobre el comportamiento físico de las mezclas de polímeros. Además, realizó una distinción general entre las técnicas de reciclaje aplicadas a polímeros compatibles y no compatibles. También, reportó el potencial de reciclaje de plásticos mezclados derivados de residuos no clasificados y del efecto del reprocesamiento térmico sobre el comportamiento morfológico y termo mecánico de mezclas de polímeros. De dicha revisión se concluyó que la tecnología de mezclado es flexible, capaz de brindar un desempeño personalizado a cualquier tipo de mezcla. Adicionalmente, que las dificultades en el reciclaje de mezclas no son solo técnicas, sino también relacionadas con la estabilidad del suministro de plástico, de la formulación de la mezcla y de la situación del mercado.

Otro estudio interesante relacionado con las técnicas de separación de residuos plásticos [29] por medio de una revisión para especificar el beneficio de la separación en el reciclaje de plásticos, aclarando los métodos de separación en el reciclaje de plásticos e inspeccionando los factores, métodos, mecanismos y obstáculos relacionados con la flotación del plástico. Además, enfatizan en la modificación de la superficie como un procedimiento esencial para mejorar la técnica de separación de plásticos. De dicha revisión se concluyó que la flotación es una tecnología prometedora para la separación de residuos plásticos que puede reducir el impacto negativo en el medio ambiente, proporcionar materias primas calificadas y mejorar la eficiencia del reciclaje de plásticos. También, que el rendimiento de la flotación está estrechamente relacionado con la reconstrucción de la superficie y el tamaño, la forma y la composición química de los constituyentes.

Un estudio adicional referente al tema de separación de residuos plásticos mixtos es el realizado por Zhao, Lv y Ni [30] quienes desarrollaron una revisión centrada en un método ecológico y potencialmente rentable para la separación y recuperación de plásticos y la extracción

de disolventes, incluyendo el método de disolución/precipitación y extracción de fluido supercrítico, que produce residuos plásticos recuperados de alta calidad comparables a los materiales vírgenes. Además, los métodos estudiados se discutieron tomando como ejemplos plásticos producidos en masa (PS, PC, poliolefinas, PET, ABS y PVC). De dicha revisión se concluyó que, a pesar de las propiedades ecológicas que incluyen el ahorro de energía y la menor emisión de CO<sub>2</sub> de la técnica actual de extracción por disolvente de residuos plásticos aún enfrenta desafíos y dificultades que limitan su desarrollo. También, que la disolución de plásticos mixtos en disolventes es compleja y difiere de la del plástico individual. Por otro lado, que la existencia de disolventes e impurezas en los productos recuperados da como resultado la degeneración de las propiedades del material en comparación con las de los materiales vírgenes.

Por su parte, en [31] se presentó una investigación sobre la separación de PET y PVC utilizando tecnología de separación hidro ciclónica, incluida la influencia de la caída de presión y la relación de división en el rendimiento de la separación a través de la experimentación y la simulación. Los autores indicaron que hubo una separación eficaz con hidrociclones cuando la geometría era en forma de partículas en vez de escamas. También, que la eficiencia de separación aumenta con el aumento de la caída de presión. Por último, que el efecto de cizallamiento dentro de los hidrociclones es una gran ventaja para dispersar las partículas de plástico que se pegan entre sí para mejorar el proceso de separación.

En el campo de la clasificación de residuos sólidos urbanos (RSU), en [32] proporcionan una descripción general del estado de la técnica de separación en el campo de la clasificación automatizada de RSU separados en origen con el fin de reciclarlos. Además, el documento está destinado a ayudar a los diseñadores de sistemas automatizados de clasificación de desechos a seleccionar tecnologías adecuadas, como sensores, actuadores, algoritmos de control y procesos de clasificación para reciclar RSU separados en origen. También, presentaron una discusión detallada sobre la variedad de materiales que se pueden clasificar, así como los sensores y los sistemas de manejo de materiales utilizados. Se concluyó que la mayoría de los avances de la investigación en el área de los sistemas automatizados de clasificación de residuos sólidos urbanos se han llevado a cabo en países desarrollados. Adicionalmente que debe tenerse en cuenta que el costo de la tecnología de clasificación automatizada de desechos desempeñará un papel importante en su

aceptabilidad en países en desarrollo, por lo que es necesario desarrollar tecnologías de clasificación de desechos automatizadas de bajo costo y generalizadas para resolver el problema de la gestión de desechos en los países en desarrollo.

Continuando con el tema de reciclaje de mezclas de polímeros, otra alternativa que ha llamado mucho la atención es la utilización de aditivos compatibilizantes. De hecho, hay varias investigaciones que enfocan sus esfuerzos en tratar de compatibilizar polímeros reciclados con distinta naturaleza química. Uno de ellos es el trabajo presentado en [33] se utilizó ftalato de dialilo (DAP) como co-agente en el proceso de inserción de polipropileno junto con anhídrido maléico (MAH) para la compatibilización con tereftalato de polietileno reciclado. Se analizó el efecto del DAP sobre el grado de injerto de MAH, el índice de fluidez (MFI) y propiedades térmicas. Además, se estudió la eficacia del polipropileno injertado con ftalato de dialilo y anhídrido maléico como compatibilizador para mezclas PP/PET reciclado. De dicha investigación se concluyó que con la adición de una cantidad adecuada de del co-agente DAP, el grado de injerto del MAH se mejoró significativamente y el MFI se reduce simultáneamente, lo que significa que el grado de edición de cadena puede reducirse.

Por su parte, en [34] se usó un copolímero de poli (etileno-co-ácido metacrílico) como compatibilizador para procesar mezclas de residuos plásticos que contenían PET y polietileno de alta densidad (PE). Además, se estudió el efecto de la mezcla de copolímeros con residuos plásticos, su respuesta a la tensión-deformación y el análisis sobre la mejora de las propiedades de los reciclados. Los autores concluyeron que el reciclaje dual de residuos plásticos no solo exalta la ventaja de reciclaje, sino que también proporciona un producto reciclado comparablemente mejor. Por último, que el compatibilizante utilizado se agrega en un porcentaje variable, independiente del cual, el material exhibe mejores prestaciones mecánicas.

Un estudio similar es el realizado por Mulla y Shaban [35] quienes estudiaron la compatibilización del polipropileno reciclado (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) utilizando dos tipos de compatibilizadores: anhídrido maléico injertado con PP y anhídrido maléico injertado con HDPE usando un reómetro de cono y placa. Además, investigaron si las mezclas compatibilizadas del PP y HDPE reciclados proporcionaban propiedades reológicas y mecánicas mejoradas para

aplicaciones industriales. De dicha investigación se concluyó que los compatibilizadores no solo mejoran la unión entre las diferentes cadenas de polímero dentro de la matriz del PP y HDPE, sino que también cambian la composición química termoplástica que es muy importante para aplicaciones de uso final.

Como se vio en esta revisión de la literatura, existen técnicas actuales que permiten abordar el tema de aprovechamiento de residuos provenientes de tratamientos de resinas plásticas recicladas posconsumo, utilizando tecnologías actuales. Sin embargo, para empresas medianas y pequeñas de este sector estas técnicas se encuentran fuera de su alcance, por lo que una alternativa es implementar el procedimiento propuesto en esta investigación.

### *B. Ensayos térmicos*

Caracterizar adecuadamente cada muestra del material de interés (material de asiento) es fundamental para identificar los componentes involucrados en dicho material. Es por ello, que definir las condiciones de los ensayos térmicos es una tarea que no solo debe involucrar el conocimiento previo del material, sino que también debe haber un apoyo basado en investigaciones anteriores referentes a este tipo de materiales y la manera como se desarrollan estos ensayos. Por ejemplo, López, Fonthal y Ariza [36] realizaron calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) a polímeros recolectados como basura en la ciudad de Armenia. Dentro de estos polímeros se encuentran poliolefinas (PP y PE) y PET. En el análisis DSC utilizaron una velocidad de calentamiento de 10 °C/min para el estudio de poliolefinas. Para el estudio del PET utilizaron una velocidad de calentamiento de 5 °C/min. El enfriamiento se realizó a la misma velocidad de calentamiento. En cuanto al análisis por TGA, para el PP, el PE y el PET utilizaron una temperatura máxima de ensayo de 550 °C, 600 °C y 600 °C respectivamente. La velocidad de calentamiento tanto para el PP como para el PET fue de 10 °C/min y para el PE fue de 20 °C/min. La velocidad de enfriamiento fue la misma utilizada para la velocidad de calentamiento.

Por su parte, Schindler, Doedt, Gezgin, Menzel y Schmolzer [37] en su trabajo utilizaron DSC y TGA para la identificación de varios polímeros dentro de los cuales se encuentran

poliolefinas como el PP. Para el ensayo DSC utilizaron una velocidad de calentamiento de 10°C/min para todas las muestras. La velocidad de enfriamiento fue la misma utilizada para la velocidad de calentamiento. Para el análisis por TGA utilizaron una velocidad de calentamiento de 10°C/min hasta una temperatura máxima de ensayo de 800°C para todas las muestras.

En [38] se utilizó DSC como herramienta para evaluar la compatibilización de polietilentereftalato (PET) con polietileno de alta densidad (HDPE). En su análisis térmico por DSC utilizó una velocidad de calentamiento de 10°C/min para todas las muestras estudiadas.

Por otro lado, cuando se vuelve importante la determinación de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de los polímeros. El DSC convencional no es suficiente para lograr una identificación verídica y confiable. Es por ello, que el DSC de temperatura modulada (MDSC) es el complemento de la técnica que permite determinar esta propiedad, lo que hace importante también identificar las condiciones idóneas para realizar dicho ensayo. Un ejemplo de investigaciones donde se hace necesario utilizar MDSC es en [39] donde se usó esta modalidad de la técnica para determinar las propiedades térmicas de fibras de PLA específicamente para estudiar la transición vítrea y la entalpía de relajación. Utilizaron una tasa de calentamiento de 1°C/min, con una amplitud de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y una frecuencia de 60 segundos.

Un ejemplo adicional, es el trabajo en el cual se caracterizaron mezclas de polipropileno de alto impacto con refuerzos de diferente naturaleza para aplicaciones en automoción [40]. Cabe resaltar que, a pesar de no utilizar MDSC en su desarrollo experimental sino DSC convencional enfatiza en las condiciones más usuales que se tienen en cuenta a la hora de llevar a cabo un ensayo de tipo MDSC, dichas condiciones son: una velocidad de calentamiento entre 0-5°C/min, una amplitud de modulación de  $\pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$  y una frecuencia de 60 segundos.

## EXPERIMENTACIÓN

### A. *Muestras y preparación de las muestras*

Los residuos termoplásticos de interés fueron suministrados por la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S ubicada en el municipio de Itagüí, Antioquia Colombia. El procedimiento de obtención del material de asiento inicia con el lavado de las materias primas que se encuentran en estado de suciedad y contaminación. La etapa de lavado consiste básicamente en introducir las materias primas a un recipiente metálico (con una capacidad aproximada de 27000 cm<sup>3</sup>) que contiene en su interior unas cuchillas. Dicho recipiente cuenta con un sistema de alimentación de agua y con cierta cantidad de jabón sólido. Todos estos componentes juntos con el giro de las cuchillas permiten eliminar la suciedad y la grasa presente en las materias primas. La Figura 10 muestra el esquema que compone el sistema de lavado.



Fig.10. Sistema de lavado propio de la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S. a) recipiente metálico y cuchillas, b) sistema de alimentación de agua y c) jabón sólido.

Nota: foto tomada en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.

Con la etapa de lavado, las materias primas han quedado libres de suciedad o grasa impregnada, pero siguen contaminadas con otros tipos de materiales (como metales y material de asiento). Es por ello, que se hace necesario luego del lavado una etapa de decantado que consiste en un tanque lleno de agua y con aspas que permite arrastrar el material de la superficie de dicho tanque hacia unas bandas transportadoras. En la Figura 11 se muestra el tanque de decantación junto con las aspas y las bandas transportadoras, diseño elaborado propiamente por la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.

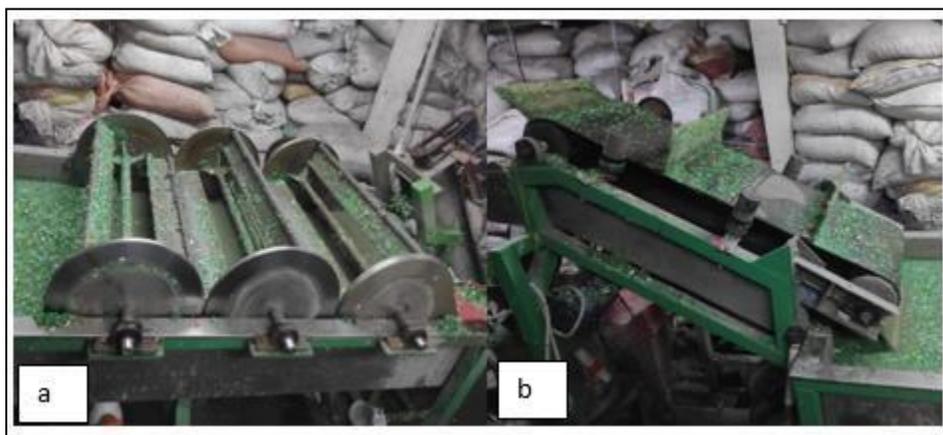


Fig.11. Sistema de etapa de decantado. a) Tanque de decantación con aspas y b) bandas transportadoras.

Nota: foto tomada en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.

Con esta etapa, el material de valor para la empresa no se precipita y puede ser llevado a un sistema de secado y, finalmente ser sometido a procesos termo mecánicos. De acuerdo con información suministrada por Julián Marín, jefe de producción de la compañía, en el tanque de decantación queda precipitado pantano, metales y varios tipos de termoplásticos. Estos termoplásticos precipitados se les conoce en el gremio de reciclaje de plásticos como material de asiento. En la Figura 12 se muestra el material precipitado en el tanque de decantación.



Fig.12. Material precipitado en el tanque de decantación.

Nota: foto tomada en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.

Para la obtención del material de asiento, que es el material de interés para este proyecto de investigación, se realiza el siguiente procedimiento: se cuenta con otro tanque de decantación, al que se le ha adicionado una cantidad suficiente de agua. A este sistema se le adiciona sal mineral (la cantidad se determina empíricamente cuando dicha sal haya quedado completamente solubilizada en el agua del tanque) lo que permite que el agua aumente su densidad. La Figura 13 ilustra esquemáticamente los componentes del segundo proceso de decantación. Cabe aclarar que en dicha imagen el nivel del agua en el tanque aún no es el indicado, ya que debe quedar mucho más alto. También, lo que se observa de color blanco en la imagen es la sal mineral que ya se ha introducido en el tanque.

Al introducir los precipitados mencionados anteriormente, se espera que tanto el pantano como el metal se precipiten en este nuevo tanque y que el material de asiento quede en la superficie y pueda ser separado. La Figura 14 muestra el material de asiento que ha quedado en la superficie del tanque, ya que la sal aumenta la densidad del agua, permitiendo que el material de asiento pueda ser separado debido a esa diferencia en las densidades.



Fig.13. Sistema de decantación para la obtención del material de asiento.  
Nota: foto tomada en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.



Fig.14. Material de asiento en la superficie del tanque listo para ser separado.  
Nota: foto tomada en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.

Posteriormente, se realizó un proceso de secado en un horno con circulación de aire a 80 °C por 24 horas para eliminar toda la humedad presente. No es necesario realizar un proceso de conminución ya que los residuos de interés fueron sometidos a trituración junto con los termoplásticos posconsumos antes de ser lavados y decantados por lo que se encuentran en forma de escamas.

Finalmente, se tomaron 3 muestras, cada una de ellas extraídas cada 20 días en lotes con ubicaciones diferentes en la planta de Bioplast de Antioquia para determinar la variabilidad de cada una de ellas. Dichas muestras fueron denominadas: LOTE 1 para la muestra extraída en el periodo 1; LOTE 2 para la muestra extraída en el periodo 2; LOTE 3 para la muestra extraída en el periodo 3.

El aditivo que se va a utilizar para realizar las mezclas con los residuos termoplásticos de interés es comercializado en el Valle de Aburrá, por lo que sus condiciones de tamaño de partícula y geometría se encuentran apropiados para el trabajo experimental posterior. Adicionalmente, se trata de un aditivo utilizado internamente por la empresa Bioplast de Antioquia que sirve como compatibilizante para los procesos de transformación en los que la materia prima es una mezcla de dos poliolefinas (tales como polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados).

## *B. Caracterización*

Para los ensayos de caracterización se tomaron muestras de cada uno de los tres lotes de acuerdo con las especificaciones de cada equipo de caracterización y se llevaron a los laboratorios correspondientes.

### *1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)*

Se realizó un análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con el fin de identificar los grupos funcionales presentes en los residuos termoplásticos de interés. Este análisis se llevó a cabo en un espectrómetro marca PerkinElmer modelo Spectrum Two ubicado en

el laboratorio de Química de Polímeros de la Universidad de Antioquia. Este análisis también se realizó para el aditivo utilizado para el desarrollo de las mezclas.

## 2. *Índice de fluidez (MFI)*

La medición del índice de fluidez se realizó en el laboratorio de Química de Polímeros de la Universidad de Antioquia en un plastómetro marca Atlas modelo MFI2, con una temperatura de 260 °C que fue escogida directamente por el laboratorio donde se hizo el ensayo, ya que fue una temperatura en la cual el ensayo se pudo llevar a cabo con normalidad, aplicando una carga de 2.16 Kg. Este procedimiento se aplicó a las tres muestras estudiadas según la norma ASTM D 1238 procedimiento A [41].

## 3. *Viscosimetría rotacional*

Este ensayo se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (CIDEMAT) ubicado en la Sede de Investigación Universitaria (SIU) de la Universidad de Antioquia en un reómetro rotacional Kinexus marca Malvern, con un rango de velocidad de 0.01 a 10.000 s<sup>-1</sup> a una temperatura de 245 °C (temperatura representativa a los perfiles utilizados en el procesamiento por extrusión en la empresa Bioplast de Antioquia) y con una separación de platos de 1 mm (gap).

## 4. *Termogravimetría (TGA)*

Este ensayo se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (CIDEMAT) en un TGA Q500 marca TA Instrument Inc, en una atmósfera de nitrógeno con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y una temperatura final de ensayo de 600 °C. Estas condiciones de análisis se eligieron con base en el estado del arte presentado previamente.

## 5. *Calorimetría diferencial de barrido (DSC)*

Este análisis se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (CIDEMAT) en un calorímetro diferencial de barrido DSC Q200 marca TA Instrument Inc. Las condiciones bajo las cuales se realizó este ensayo se muestran en la tabla V.

TABLA V  
CONDICIONES DE CICLO TÉRMICO PARA ENSAYOS DSC

	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Velocidad de enfriamiento (°C/min)	Amplitud (°C)	Período (segundos)
DSC	10	10	No aplica	No aplica
MDSC	2	No aplica	±1	60
Borrado térmico	20	20		

Para el borrado térmico se realizó un calentamiento convencional desde temperatura ambiente hasta 270 °C. Luego, se enfrió hasta temperatura ambiente. Para el ciclo térmico se realizó enfriamiento convencional hasta -90 °C. Luego un calentamiento modulado hasta 130 °C sosteniendo dicha temperatura por 5 minutos. Posteriormente se realizó un calentamiento convencional hasta 270 °C sosteniendo dicha temperatura por 5 minutos. Finalmente, se realizó enfriamiento convencional hasta temperatura ambiente.

#### 6. *Extrusión-peletizado de mezclas*

Se realizó el procesamiento por extrusión- peletizado a las mezclas del material de asiento con el aditivo suministrado por la empresa Bioplast de Antioquia. El criterio para definir la dosificación de la mezcla con el aditivo se basó en la rentabilidad a nivel industrial. Una dosificación del 1% es rentable para las empresas del gremio del reciclaje de plásticos. Las características de la extrusora utilizada se especifican en la tabla VI; se trata de una extrusora monohusillo marca IMS (Insoexca Maquinaria Suramérica) modelo SJL-120, de doble estación, tipo corte cadena, línea para peletizado de poliolefinas (polipropilenos y polietilenos).

En la figura 15 se muestra el montaje del proceso de peletización utilizado, el cual se compone de la extrusora, una cuba con agua que se mantiene a temperatura ambiente que sirve para reducir la temperatura del parison luego de salir de la boquilla del cabezal y pueda ser triturado (conocido en el gremio también como picado) posteriormente y adquirir la morfología de pellet.

Se utilizaron los mismos parámetros de procesamiento para los tres lotes del material de asiento estudiados. En la figura 16 se muestran los parámetros de control que se tuvieron en cuenta de acuerdo con las condiciones de procesamiento manejadas por la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S. Se trata de una velocidad de rotación del husillo de 60 Hz, una velocidad de corte del triturador de 18,4 y un perfil de temperatura que empieza en 235 °C en las tres primeras zonas del cabezal y luego desciende en 5 °C hasta llegar a las primeras zonas. Se debe tener en cuenta que hay algunas zonas que se encuentran sin uso (figura 16 c, recuadros marcados como “malo”) debido a falta de mantenimiento. Sin embargo, los demás sensores se encuentran en buen estado, lo que es suficiente para garantizar la productividad en la compañía.



Fig.15. Proceso de extrusión-peletizado utilizado para el procesamiento del material de asiento. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

TABLA VI  
 ESPECIFICACIONES DE LA EXTRUSORA UTILIZADA PARA EL PELETIZADO DEL MATERIAL DE  
 ASIENTO.

Ítem	Descripción	Unidad	Primera etapa	Segunda etapa
1	Diámetro del tornillo	mm	120	120
2	Relación L/D	No aplica	22/1	12/1
3	Velocidad de rotación del tornillo	Rev/min	MÁX. 40	MÁX. 50
4	Velocidad del motor	Rev/min	1450	1450
5	Material del barril y del tornillo	No aplica	38CrMoAl	38CrMoAl
6	Capacidad de producción	Kg/h	No aplica	250-300
7	Potencia del motor principal	Kw	37	22
8	Control de velocidad	No aplica	No aplica	Variador de velocidad
9	Potencia de calentamiento del barril	Kw	4 zonas, 32	2 zonas, 16
10	Altura de los ejes del tornillo	mm	1140	500
11	Capacidad de calentamiento del molde	Kw	6	11
12	Dispositivo automático de cambia mallas	No aplica	Sistema hidráulico	Sistema hidráulico
13	Potencia del motor de la unidad hidráulica	Kw	2.2	2.2
14	Presión de la unidad hidráulica	MPa	16.0 (máx. 25.0)	16.0 (máx. 25.0)
15	Número de huecos en el cabezal de la extrusora	No aplica	20	20
16	Dimensiones (longitud*ancho*altura)	mm	3150*1900*18 50	2500*1900*650

Nota: información suministrada por la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

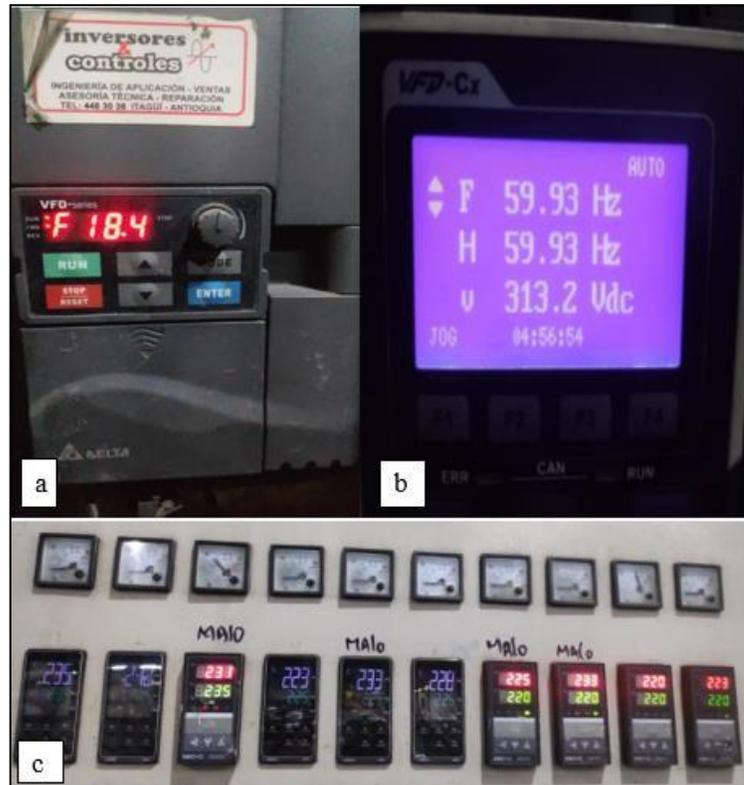


Fig.16. Parámetros de control utilizados para el procesamiento por extrusión del material de asiento, a) velocidad de corte; b) velocidad de rotación del husillo y c) perfil de temperatura. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

### 7. *Inyección de mezclas peletizadas*

El procesamiento por inyección de los pellets obtenidos de cada lote de material de asiento se realizó en el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) sede Calatrava, Itagüí-Antioquia, en el Centro de Diseño y Manufactura del Cuero. La tabla VII indica las especificaciones técnicas de la inyectora utilizada en este trabajo. La máquina inyectora utilizada se ilustra en la figura 17.

TABLA VII  
 ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA UTILIZADA PARA EL PROCESO DE INYECCIÓN DEL  
 MATERIAL DE ASIENTO.

Ítem	Descripción
Fabricante	Well Tec Machinery LTDA
Marca	Well Tec
Modelo	TTI-90SEII
Variable	Temperatura, fuerza de presión
Unidad de medida	Tonelada
Rango de trabajo	T: 25 °C a 450 °C 0 Bares a 100 Bares
Resolución	1 °C/1 Bares
Indicación	Digital
Sensor	Contacto
Potencia	7,38 KW

En la figura 18 se muestran todos los parámetros que se tuvieron en cuenta para la inyección de los tres lotes peletizados. Se utilizó un molde para la obtención de probetas de impacto Charpy e Izod, ya que fue el molde que se encontraba disponible en la máquina inyectora.



Fig.17. Máquina inyectora utilizada para el procesamiento por inyección. Foto tomada en el SENA sede Calatrava- centro de diseño y manufactura del cuero.

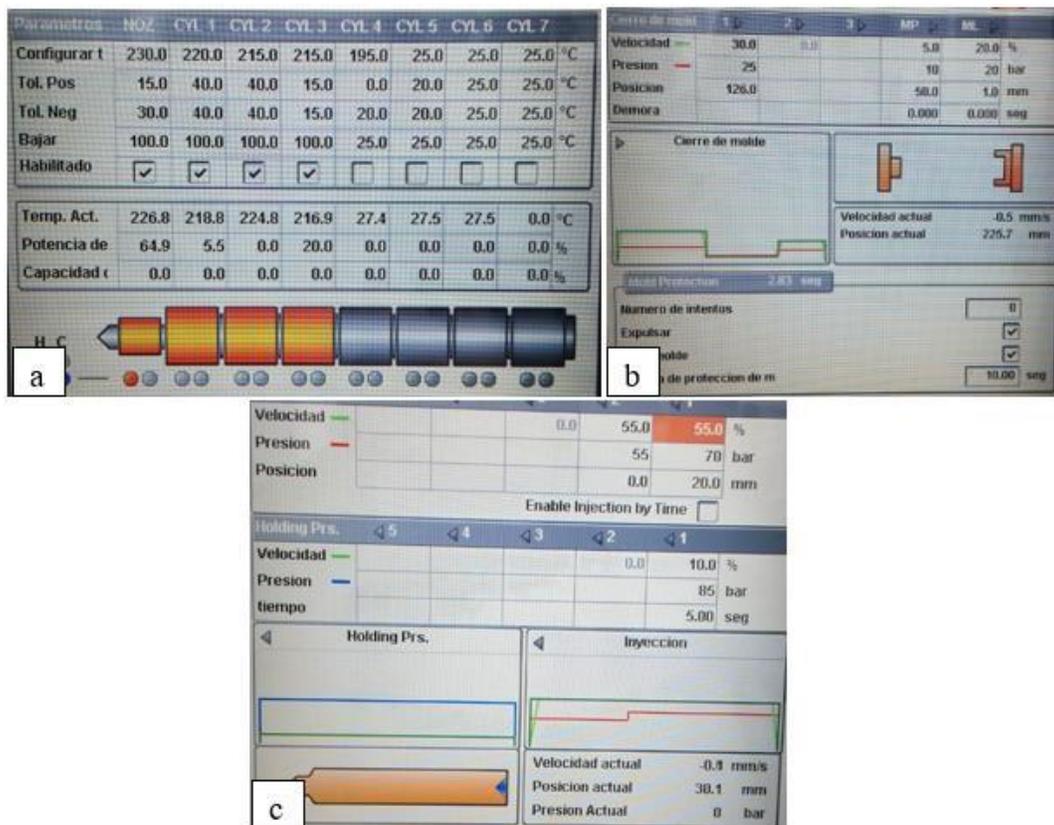


Fig.18. Parámetros de inyección utilizados para la elaboración de probetas de impacto, a) perfil de temperatura del cilindro; b) cierre del molde y c) unidad de inyección. foto tomada en el SENA sede Calatrava- Centro de Diseño y Manufactura del Cuero.

Para los pellets de la primera muestra (lote 1) se utilizaron dos perfiles de temperatura, uno denominado perfil de temperatura bajo (figura 18 a) y l otro denominado perfil de temperatura alta (figura 19).

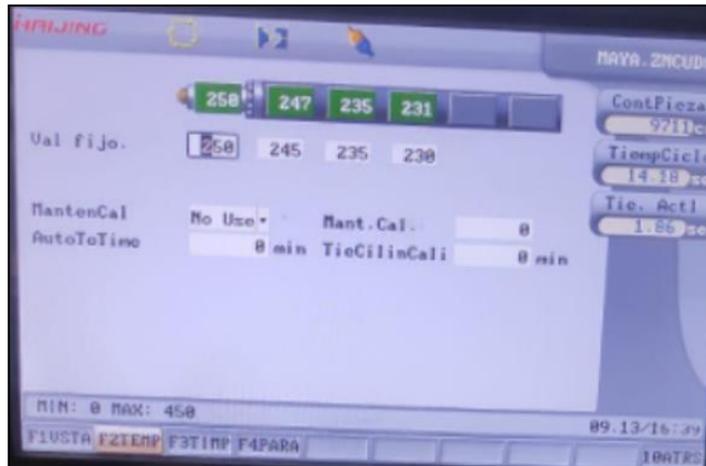


Fig.19. Perfil de temperatura alto en el sistema de inyección. Foto tomada en la empresa JOR S.A.S.

### C. Caracterización de material de asiento peletizado

#### 1. Índice de fluidez

La medición del índice de fluidez a los pellets obtenidos de cada lote de material de asiento se realizó en el laboratorio de Química de Polímeros de la Universidad de Antioquia en un plastómetro marca Atlas modelo MFI2, con una temperatura de 250 °C y una carga de 2.16 Kg para las tres muestras estudiadas según la norma ASTM D 1238 procedimiento A [41]. Se escogió esta temperatura de ensayo dado que el material peletizado no fluyó adecuadamente en el plastómetro a 260 °C, como sí sucedió con el material de asiento de partida.

Adicionalmente, se tomaron fotografías a los parisons obtenidos de los pellets de cada lote de material de asiento estudiados en un estereoscopio CARSON Zorb 35X\* Digital Microscope MM-480 ubicado en el laboratorio de Materiales Cerámicos de la Universidad de Antioquia.

#### 2. Calcinación

La etapa de calcinación a los 3 lotes de material de asiento se realizó con el fin de obtener las posibles cargas minerales presentes en estos materiales y poder caracterizarlas. Para este procedimiento se utilizó un horno disponible en el laboratorio de fundición de la Universidad de Antioquia. El procedimiento consistió en programar el horno para que alcanzara una temperatura de 550 °C. En el momento en que se alcanza dicha temperatura comienza la calcinación durante una hora. Posteriormente se apagó el horno y se dejaron enfriar las muestras durante una hora, luego se extraen del horno y se completa el enfriamiento a temperatura ambiente. Finalmente, se toman los pesos del residuo generado por la calcinación.

### 3. *Fluorescencia de rayos X (FRX)*

Con el fin de identificar los componentes del residuo obtenido por la calcinación, se realizó fluorescencia de rayos X en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X ARL TERMO ubicado en el laboratorio de espectrometría de la Universidad de Antioquia.

## ANALISIS DE RESULTADOS

### A. *Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)*

La figura 20 muestra los tres espectros obtenidos para las muestras estudiadas. Las bandas de absorción de los tres espectros difieren en números de onda estrechos y se encuentran en el rango de absorción de la misma macromolécula.

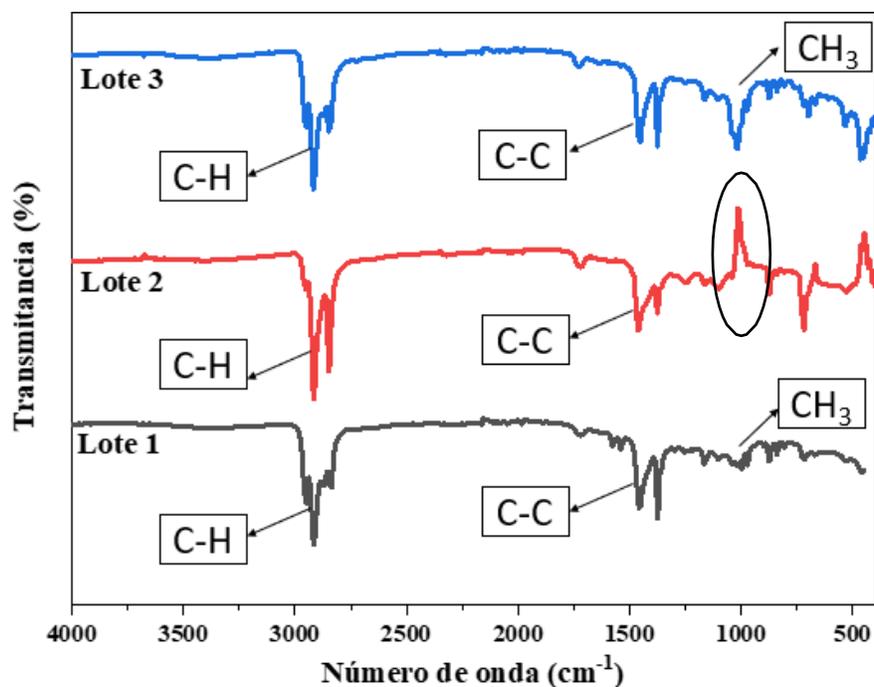


Fig.20. Espectros FTIR obtenidos para las tres muestras estudiadas.

En la tabla VIII se resumen los resultados obtenidos en el espectro FTIR. De acuerdo con los picos de absorción identificados y la revisión de la literatura, las tres muestras caracterizadas por espectroscopía infrarroja corresponden al polipropileno [42].

Este tipo de materiales por ser residuos de procesos de materias primas posconsumo (tales como lavado y decantado), normalmente presentan impurezas con aceites, grasas pinturas, etc. Dichas impurezas pueden provocar la aparición de picos poco característicos del material de interés, como es el caso del pico enmarcado en el círculo negro de la figura 19, que al parecer presentó una impureza y transmitió radiación en vez de absorberla.

TABLA VIII

RESUMEN DE BANDAS DE ABSORCIÓN IDENTIFICADAS PARA LAS TRES MUESTRAS ESTUDIADAS.

Banda (cm <sup>-1</sup> )	Tipo de movimiento	Tipo de enlace
2900-2920	Tensión	C-H
1350-1450	Tensión	C-C
1200-1000	Flexión	-CH <sub>3</sub>

B. *Índice de fluidez (MFI)*

Los resultados tanto de índice de fluidez como densidad del fundido para los tres lotes estudiados se resumen en la Tabla IX.

TABLA IX  
RESULTADOS MFI OBTENIDOS PARA LOS TRES LOTES ESTUDIADOS

Lote	Densidad de fundido (g/cm <sup>3</sup> )	MFI promedio (g/10 minutos)	Desviación estándar (g/10 minutos)
1	0,7576	23,4328	0,0591
2	0,9006	23,9270	0,3502
3	0,8085	25,8050	0,3677

Para facilitar el análisis y comprender la particularidad de la fluidez del material de asiento, se realizó una comparación entre dicho material de interés y una de las materias primas utilizadas en el procesamiento por extrusión en la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S. es decir, material que ha sido apto para poder ser peletizado. Una investigación anterior realizada por Giraldo y Betancur (2019) [27] reportó resultados de MFI para dos tipos de materias primas provenientes de esta misma compañía. Ambas materias primas corresponden a polipropileno reciclado posconsumo, las cuales difieren en color y que son utilizadas para obtener producto terminado (polipropileno peletizado) de acuerdo con las mezclas establecidas internamente por la compañía. En la Tabla X se muestran dichos resultados.

TABLA X  
 RESULTADOS MFI OBTENIDOS PARA DOS MATERIAS PRIMAS PROVENIENTES DE LA EMPRESA  
 BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S [27]

Muestra	Densidad de fundido (g/cm <sup>3</sup> )	MFI promedio (g/10 minutos)	Desviación estándar (g/10 minutos)
PP rojo	0,7400	21,1200	1,6032
PP bolas	No se reporta	8,9400	0,1151

Al comparar los resultados reportados en las Tablas IX y X se observan valores de MFI similares tanto para los tres lotes estudiados como para el polipropileno rojo, lo que indica que el comportamiento reológico del material de asiento y el polipropileno rojo son similares. Sin embargo, para el polipropileno bolas se observa un valor de MFI mucho más bajo, tanto así que su comportamiento de flujo no permitió determinar su densidad en fundido [27]. Estas diferencias en este tipo de materiales reciclados conllevan a pensar que los polímeros con mayores MFI presentan menor peso molecular, al contrario, con aquellos que presentaron MFI menos que indica un peso molecular mayor. Todo lo anterior sirve como base para darle una aplicación industrial específica a cada uno de ellos [43]. Adicionalmente, se destaca de estos resultados una disminución del peso molecular en los polímeros con un MFI mayor en comparación con el polipropileno bolas que tuvo un valor de MFI mucho más bajo lo que corresponde a un peso molecular mucho mayor [44].

Otra comparación interesante entre estos resultados obtenidos por el ensayo MFI es la apariencia de cada parison luego de la extrusión. En la Figura 21 se muestra la apariencia de cada lote de material de asiento luego de la extrusión en el MFI. Según Julián Marín, jefe de operaciones de la compañía Bioplast de Antioquia: “la rugosidad superficial de las muestras generalmente se asocia a que la mezcla en fundido no es homogénea, es decir, hay una diferencia entre las transiciones térmicas de los componentes de cada material de asiento tales como la temperatura de fusión de cristales.

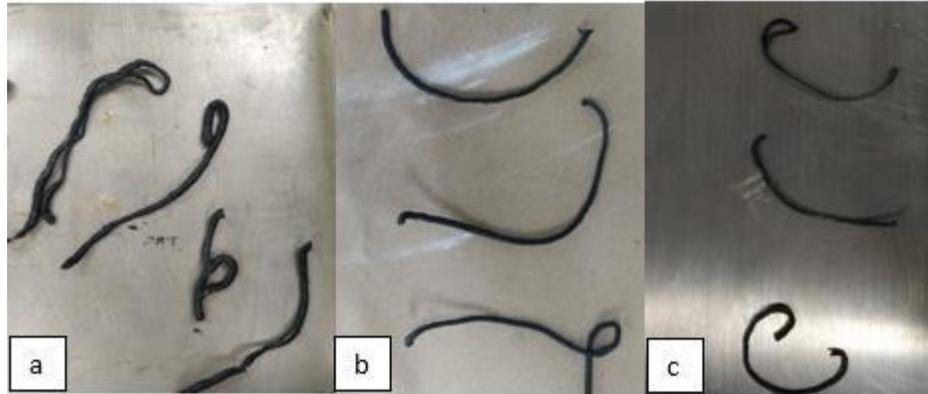


Fig.21. Apariencia del parison obtenido para los tres lotes de material de asiento. a) lote 1, b) lote 2 y c) lote 3.

Para entender mejor la particularidad en las rugosidades de los extruidos obtenidos, en la figura 22 se presentan los resultados en el trabajo de Giraldo y Betancur [27] quienes, como se mencionó anteriormente, utilizaron dos materias primas provenientes de la empresa BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S.

Es de resaltar que la superficie de ambas muestras es un poco más lisa y brillante que las de los parisons de los tres lotes de material de asiento, lo que demuestra la dificultad para obtener parisons libres de defectos luego de la extrusión que ocurre durante el ensayo MFI.

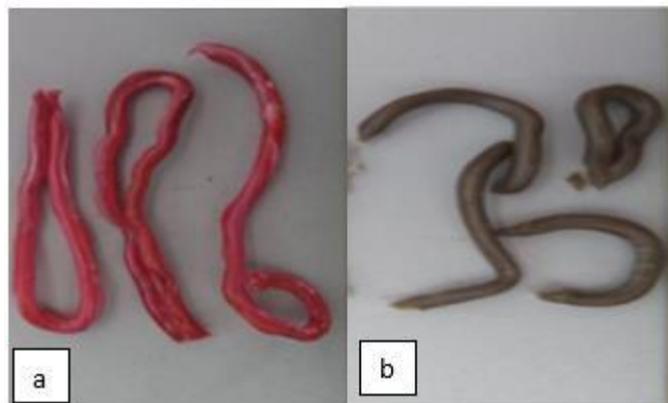


Fig.22. Apariencia de las materias primas de BIOPLAST DE ANTIOQUIA S.A.S estudiadas luego de extruidas durante el ensayo MFI. a) polipropileno rojo y b) polipropileno bolas. Tomado de [27].

En todos los casos, se tiene que si bien los valores de MFI son similares, para el material de asiento en comparación con los valores de MFI reportados por las materias primas estudiadas

por Giraldo y Betancur [27] hay una leve diferencia que es mayor para el material de interés en este trabajo. Este aumento en el MFI para el material de asiento representa, según lo reportado en la literatura una degradación en el material asociado con la disminución del peso molecular [45].

### C. *Viscosimetría rotacional*

En la Figura 23 se presentan los resultados de los ensayos de viscosimetría para los tres lotes estudiados. Lo primero que se destaca es que para los tres lotes de material de asiento la tendencia es similar, consistente en una disminución en la viscosidad a medida que se incrementa la tasa de cizalladura, un comportamiento característico de fluidos pseudoplásticos. El recuadro de color morado que se encuentra en la Figura 22 corresponde a la zona que se manejan las tasas de corte para la medición del índice de fluidez. Se observa que para dicha zona el lote 3 es el más viscoso, seguido del lote 1 y el lote 2 es el menos viscoso, resultados que son coherentes con los MFI hallados para cada una de las muestras analizadas.

Para la zona donde se da una tasa de corte de  $1 \text{ s}^{-1}$  se observa que los tres lotes presentan viscosidad de 800, 1060 y 1120 Pa\*s, respectivamente. Esta zona corresponde a un proceso MFI de bajo caudal o de un proceso de peletización a caudales intermedios donde se observa una diferencia entre el valor más bajo y el más alto de un 30% aproximadamente. Si se observa la zona a tasas de corte más altas (alrededor de  $200 \text{ s}^{-1}$  que son tasas de corte típicas de un proceso de peletización con caudales más altos) los lotes 2 y 3 exhiben valores de viscosidad que difieren hasta un 300%. Entonces, el comportamiento de los tres flujos en la zona de MFI muestra lo siguiente: el lote 1 presenta un MFI entre 23,3 y 23,5 g/10 min; el lote 2 presenta un MFI entre 23,5 y 24,4 g/10 min y el lote 3 presenta un MFI entre 25,4 y 26,2 g/10 min. De esta manera, en la zona MFI el lote 3 presenta un comportamiento más viscoso que los lotes 1 y 2, seguido del lote 2 y el lote 1 presenta un comportamiento menos viscoso que los lotes 2 y 3. De acuerdo con lo anterior, el comportamiento reológico de los tres lotes estudiados (tanto en viscosimetría como en MFI) tiene una variabilidad considerable.

Cabe aclarar que el comportamiento de las tres curvas no permite definir una prevalencia en los valores de viscosidad para las diferentes tasas de cizalladura, ya que en ciertas zonas se

presenta inestabilidad en el flujo. Lo anterior es atribuible a que en algunas zonas de cada lote de material se pudo haber presentado mayor degradación o también por dificultades en algunas zonas para la plastificación del material estudiado.

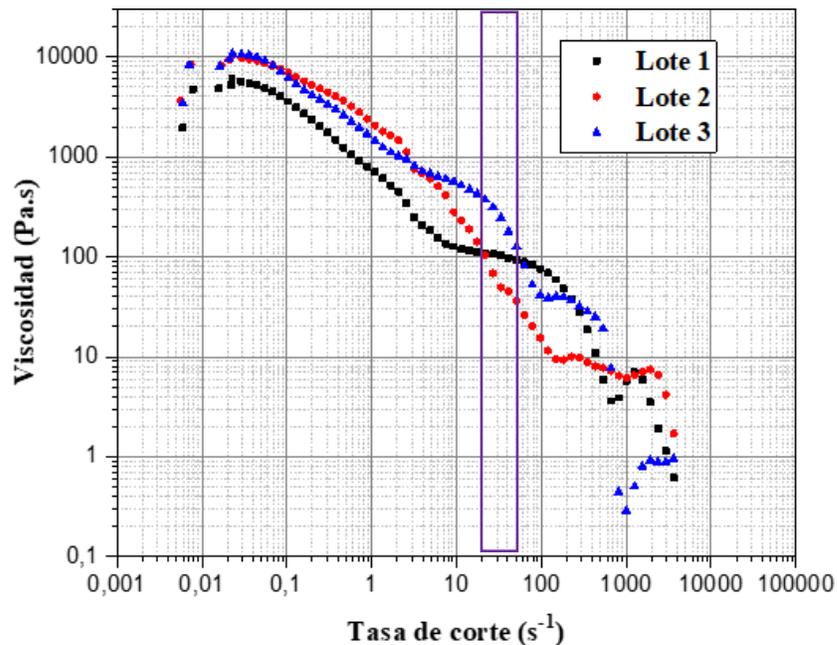


Fig.23. Resumen de resultados de ensayos de viscosimetría para los tres lotes estudiados.

#### D. *Análisis por termogravimetría (TGA)*

Los resultados de pérdida de masa como función de la temperatura para las muestras de los tres lotes se resumen en las Figuras 24, 25 y 26 respectivamente. Cabe resaltar que a pesar de que no hay una pérdida de masa perceptible se debe considerar una leve disminución de la masa inicial de cada muestra alrededor de los 100 °C a causa de la pérdida de la humedad presente en cada muestra, que para el caso de los tres lotes fue despreciable. Adicionalmente, se observa que la temperatura a la cual se da la descomposición máxima es a 477,1°C que, según la literatura se encuentra dentro del rango de temperatura estimado para la descomposición del polipropileno [46]; [36]; [47].

En la figura 25 se muestra el termograma para la muestra del lote 2. En este caso se observan dos máximos (diagrama de color rojo). Para el primer pico de 405,3 que se diferencia del otro pico de la misma gráfica, se trata de un componente que es inmisible con el polipropileno y que la literatura reporta que se trata del polietileno de alta densidad. El pico a 439,6°C representa la temperatura de descomposición del polipropileno que de acuerdo a la literatura sigue estando dentro del rango de temperatura a la cual hay una descomposición máxima para esta poliolefina [46]; [36]; [47].

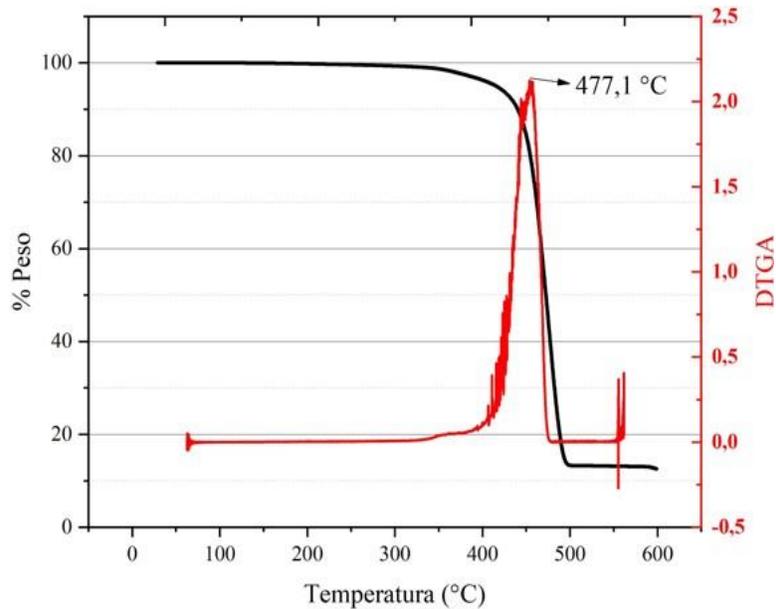


Fig.24. Diagrama TGA y DTGA obtenida para el lote 1.

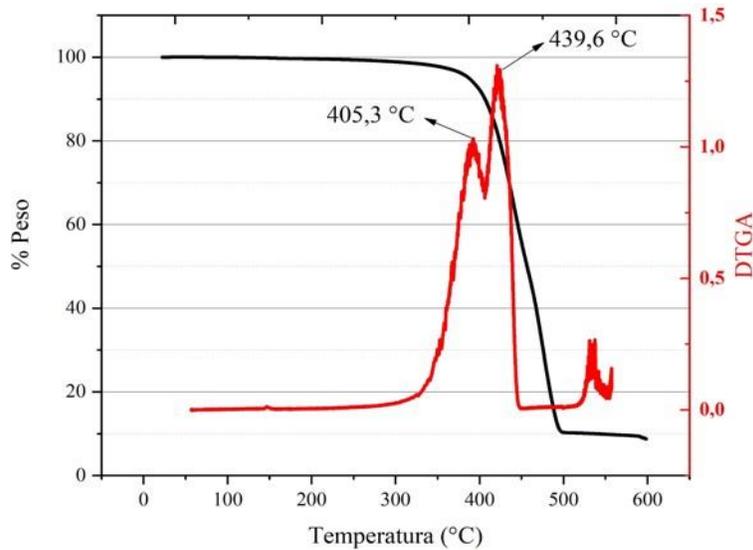


Fig.25. Diagrama TGA y DTGA obtenida para el lote 2.

La figura 26 presenta el diagrama TGA y DTGA obtenida para la muestra del lote 3. Para este lote, también aparece un pico que es característico de la temperatura de descomposición máxima del polipropileno. De los resultados obtenidos para las tres muestras es importante resaltar que el material de asiento no sufre cambios considerables a las temperaturas usuales de procesamiento que son alrededor de 200 a 230 °C (Julián Marín, Bioplast de Antioquia S.A.S.). Según las curvas identificadas para cada muestra de asiento evaluadas, no se observa temperaturas de descomposición diferente a las indicadas para las poliolefinas recicladas.

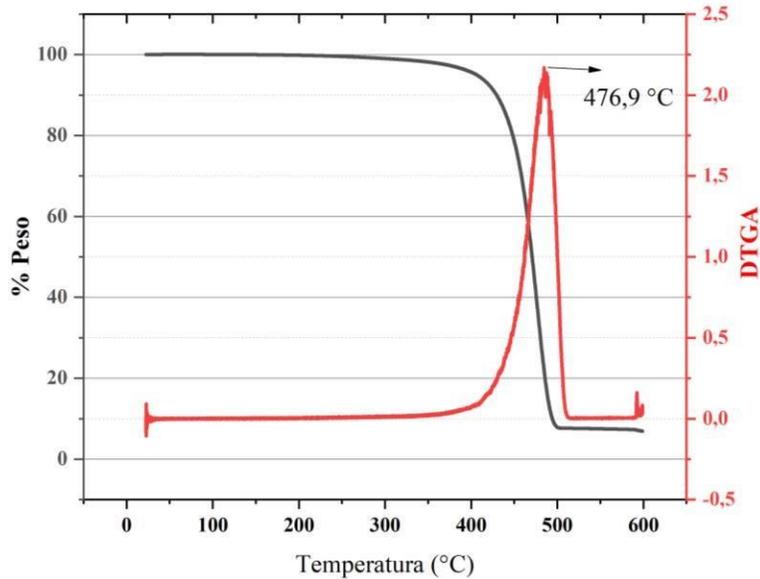


Fig.26. Diagrama TGA y DTGA obtenida para el lote 3.

De los termogramas obtenidos para cada uno de los tres lotes de material de asiento es de resaltar que hay un porcentaje que está entre el 10 y el 15% en peso de las muestras que corresponden a una sustancia que no se descomponen a la temperatura máxima del ensayo (600 °C). Estos residuos fueron caracterizados mediante fluorescencia de rayos X, obteniendo los resultados que se presentan más adelante en este informe.

#### E. *Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC)*

Para el análisis de cada uno de los termogramas obtenidos se separó la zona en un rango de temperatura entre -90 y 0 °C con el fin de visualizar transiciones vítreas de los polímeros presentes en las muestras. En las figuras 27 a 29 se muestran dichos termogramas. A pesar de amplificar ciertas zonas en el rango de temperatura mencionado, cabe resaltar que no se observó para ninguna de las tres gráficas un cambio brusco de pendiente, por lo que no fue posible identificar transiciones vítreas para ninguna de las tres muestras estudiadas.

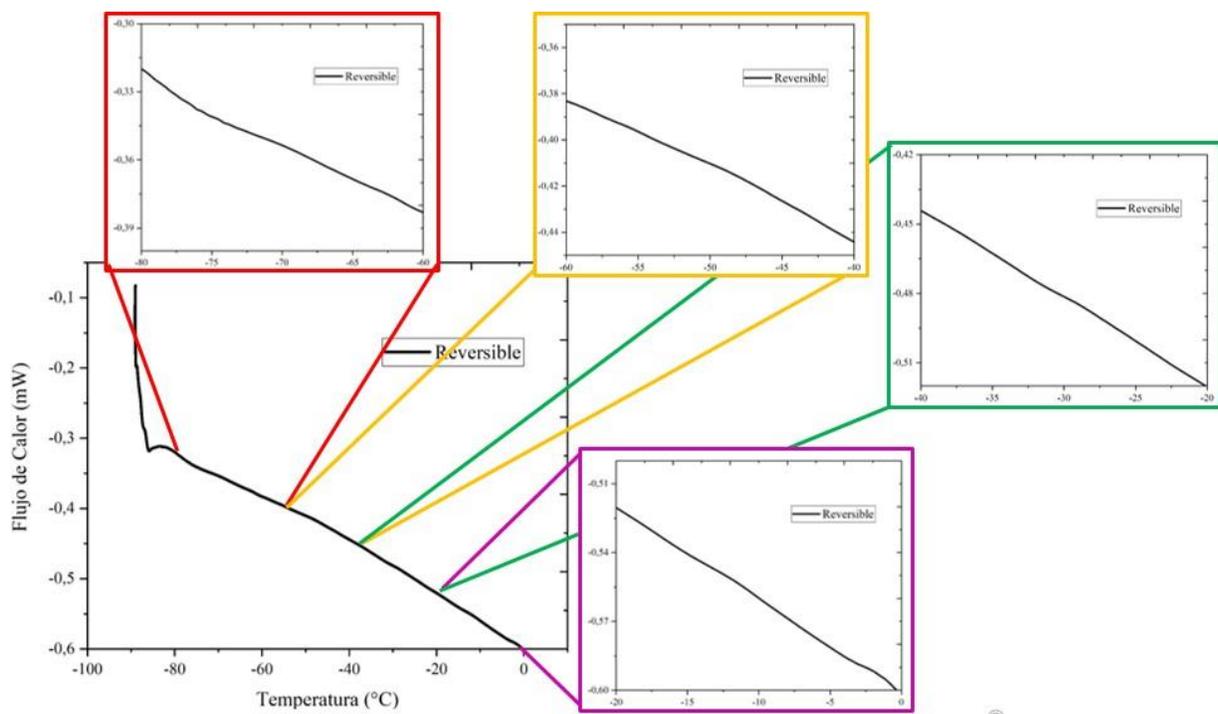


Fig.27. Termograma DSC en la zona de temperatura entre -90 y 0°C obtenida para el lote 1.

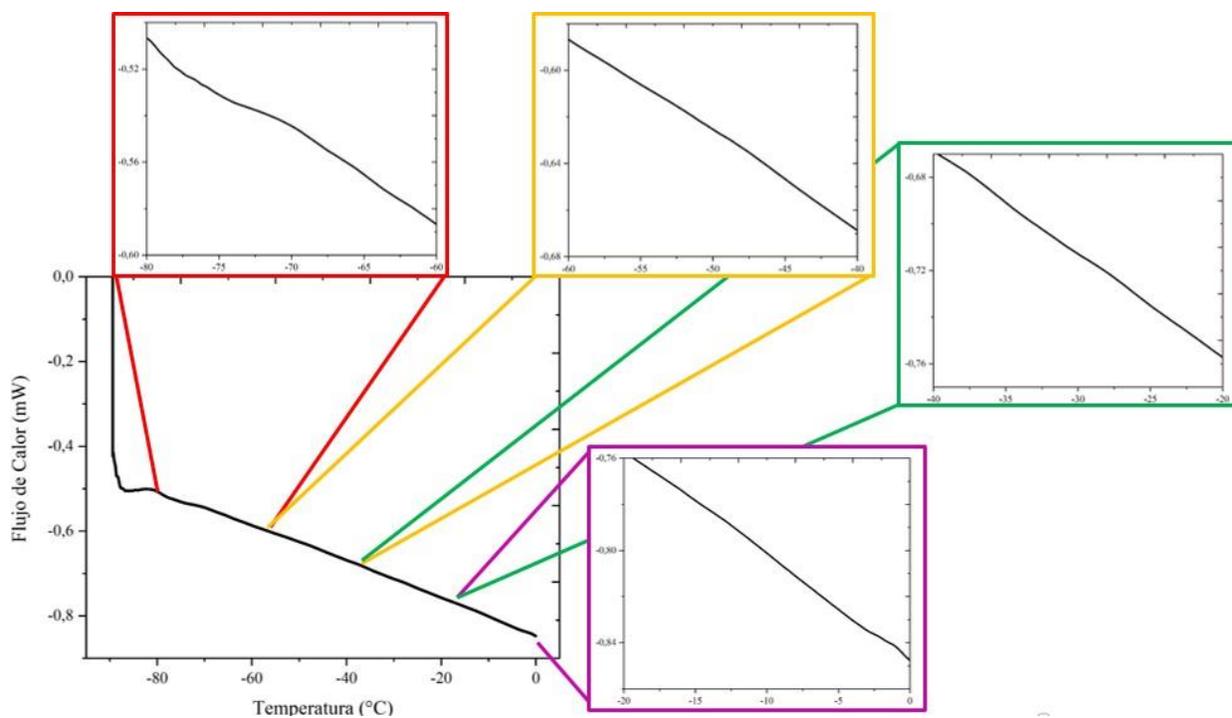


Fig.28. Termograma DSC en la zona de temperatura entre -90 y 0°C obtenida para el lote 2.

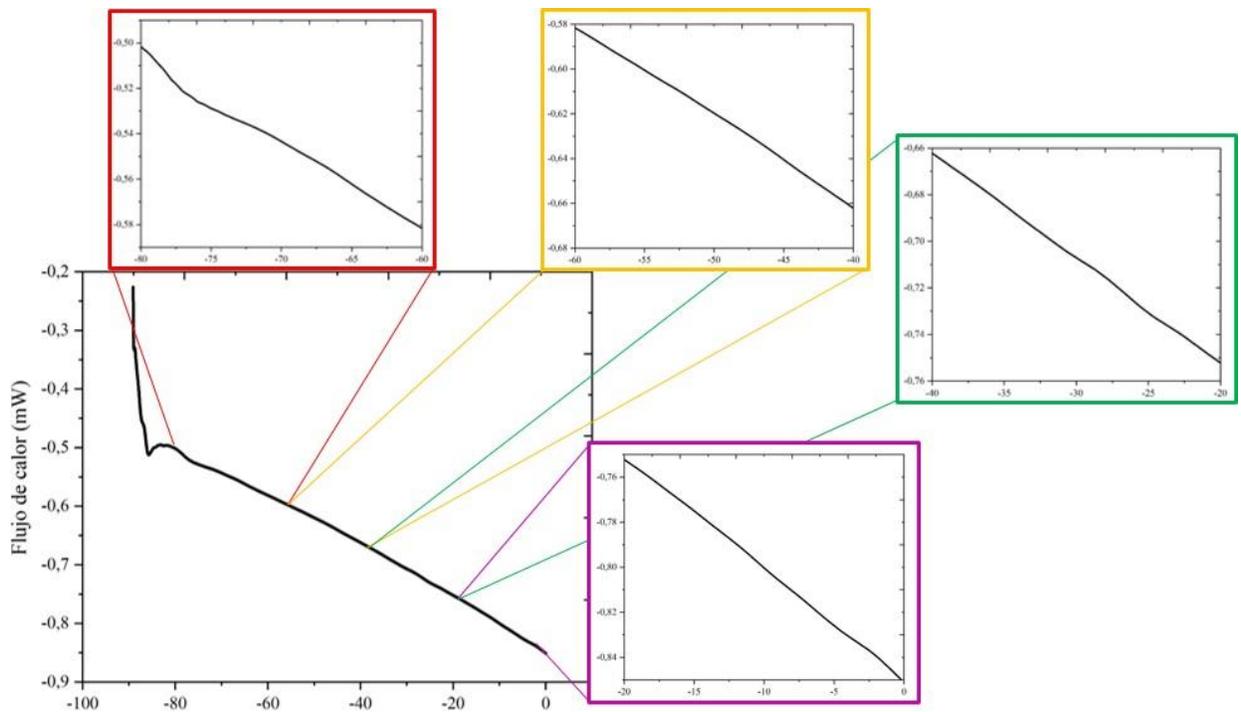


Fig.29. Termograma DSC en la zona de temperatura entre -90 y 0°C obtenida para el lote 3.

Los termogramas obtenidos para la zona de temperatura entre 0 y la temperatura máxima de ensayo se muestran en las figuras 30 a 32. En las tres gráficas, la curva de color negro representa el primer calentamiento permite borrar la historia térmica de las muestras, ya que esto puede provocar cambios en la organización de las cadenas poliméricas, que producen cambios en las curvas DSC [36]. La curva de color rojo representa el segundo calentamiento que reporta información de las muestras originalmente empleadas. Para la figura 30 se observan dos picos endotérmicos a 125,6 y 160,1 °C que corresponden a la temperatura de fusión de cristales del polietileno de alta densidad y del polipropileno, respectivamente [46]; [36]. El hecho de no reportar en el análisis mediante FTIR convencional la presencia de polietileno se debe a que en una mezcla de polietileno con polipropileno no es posible diferenciar grupos funcionales del polietileno que no estén presentes en el polipropileno.

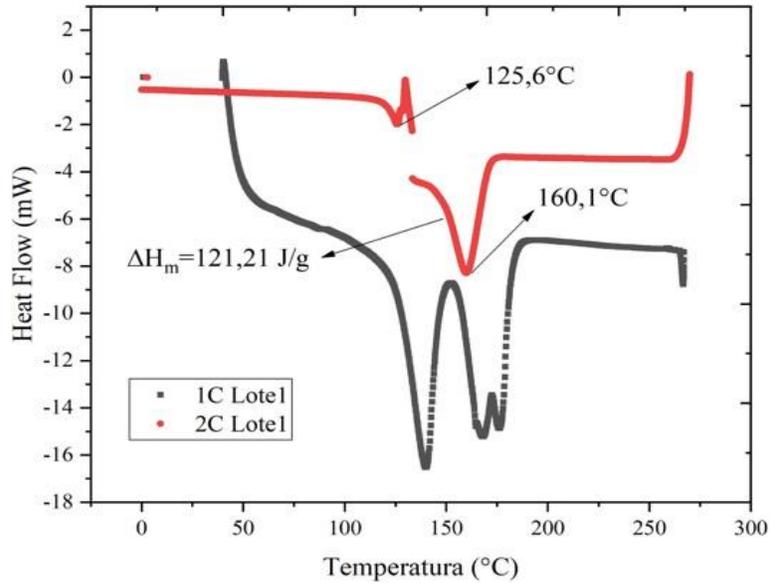


Fig.30. Termograma DSC en la zona de temperatura entre 0 °C y la temperatura máxima de ensayo obtenida para el lote 1.

El pico endotérmico observado a 160,2 °C (figura 31) corresponde a la temperatura de fusión de cristales del polipropileno, resultados que siguen siendo coherentes con los reportados por la literatura [46]; [36] Tanto el pico endotérmico como el calor de fusión obtenido en la gráfica (121,21 J/g) corresponden a información hallada para la muestra del lote 2.

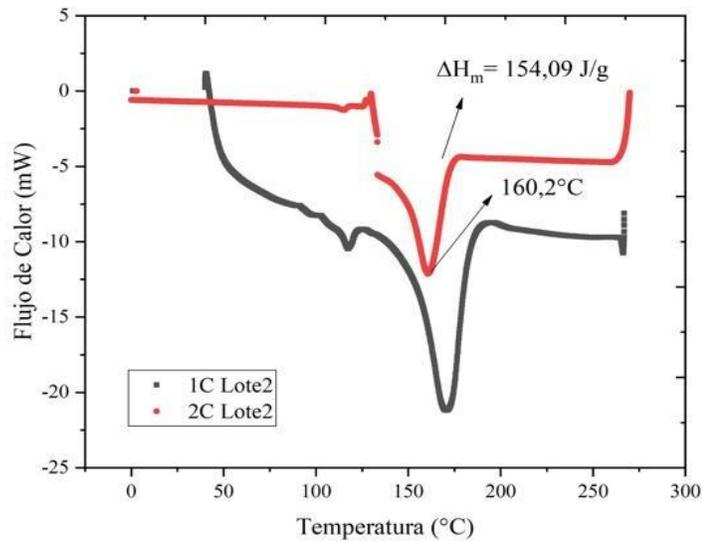


Fig.31. Termograma DSC en la zona de temperatura entre 0 °C y la temperatura máxima de ensayo obtenida para el lote 2.

Los picos registrados a una temperatura de 134,0 °C y 160 °C (figura 32) corresponden a la temperatura de fusión de cristales del polietileno de alta densidad y del polipropileno, respectivamente. Como se ha mencionado en los termogramas anteriores, son resultados que concuerdan con los rangos de temperatura reportados para este tipo de poliolefinas recicladas. También se reportan calores de fusión tanto para el polietileno de alta como para el polipropileno (55,29 y 103,42 J/mol, respectivamente). Los resultados del segundo calentamiento de cada una de las muestras estudiadas demuestran que en las tres muestras hay polietileno de alta densidad y polipropileno pero con diferentes calores de fusión de cristales, evidenciando la variabilidad que ya se ha mencionado al analizar los resultados de viscosimetría rotacional y TGA.

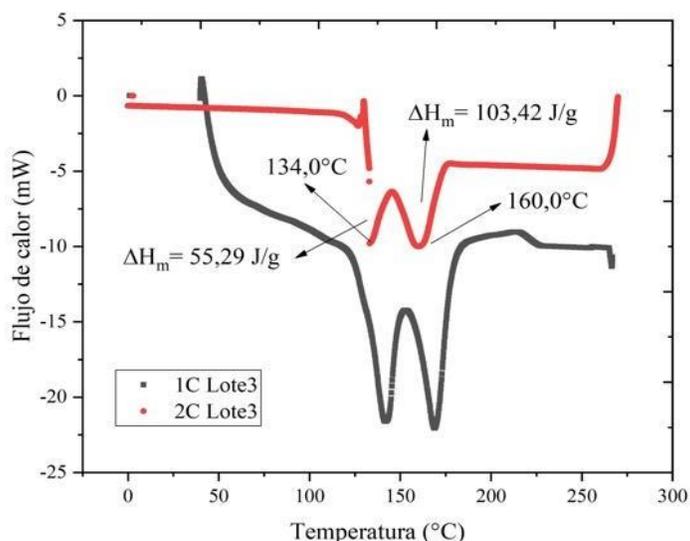


Fig.32. Termograma DSC en la zona de temperatura entre 0 °C y la temperatura máxima de ensayo obtenida para el lote 3.

Los termogramas que describen la etapa de enfriamiento para los lotes 1, 2 y 3 se muestran en las figuras 33, 34 y 35, respectivamente. La curva de color negro en las figuras indica el primer enfriamiento al que fueron sometidas las muestras y la curva de color rojo representa el segundo calentamiento (luego del borrado térmico). Para los lotes 2 y 3 se nota una similitud en cuanto al pico de cristalización que corresponde a la temperatura de cristalización del polipropileno durante el enfriamiento. Para el lote 1, a pesar de presentar una diferencia notable en su pico de cristalización, sigue siendo un valor de temperatura de cristalización que se encuentra en el rango de temperatura para el polipropileno coherente con los valores reportados por la literatura [36]. Así

mismo, los calores de cristalización obtenidos para cada uno de los tres lotes son 157,25; 161,20 y 222,93 J/g respectivamente. Es de notar que en los tres casos la energía absorbida requerida para que ocurra la fusión de cristales es menor que la energía liberada para la cristalización lo que indica que posiblemente hubo un cambio estructural.

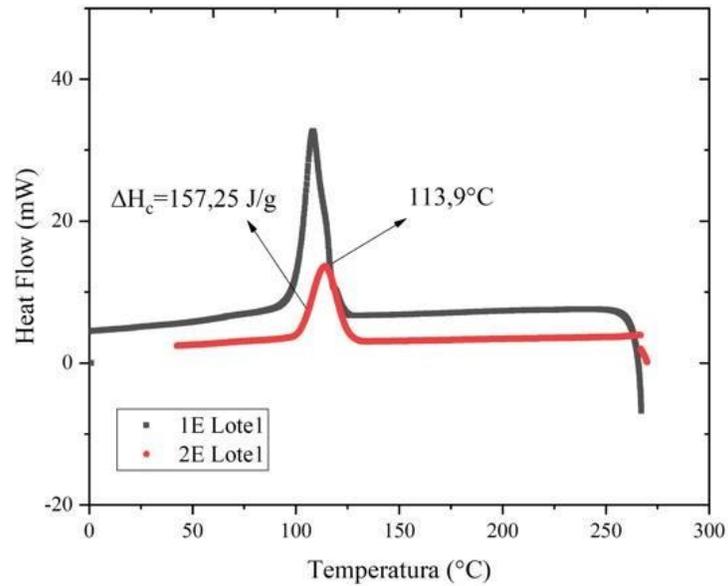


Fig.33. Termograma DSC para la etapa de enfriamiento del lote 1.

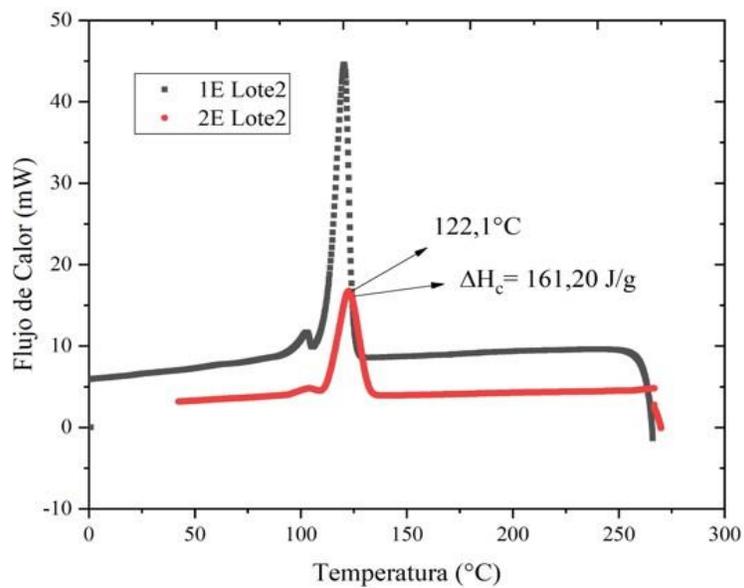


Fig.34. Termograma DSC para la etapa de enfriamiento del lote 2.

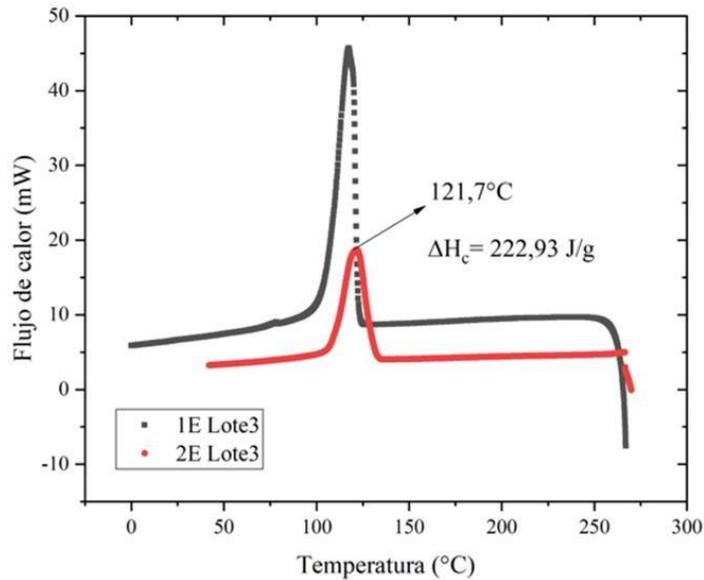


Fig.35. Termograma DSC para la etapa de enfriamiento del lote 3.

#### F. Extrusión-peletizado

El proceso de extrusión inicia con el ingreso de la mezcla a la tolva de alimentación de la extrusora. La figura 36 muestra la mezcla de cada uno de los tres lotes de material de asiento extruidos con su respectiva dosificación de aditivo compatibilizante.

Luego de que la materia ingresa a la tolva de alimentación, es transportada por el husillo hacia las diferentes zonas de la extrusora. La figura 37 muestra los parisons obtenidos para cada lote luego de salir por la boquilla del cabezal. En los tres parisons se observó dificultad para poner a punto el proceso, ya que algunos de los parisons extruidos, conocidos en la industria coloquialmente como “cuerdas” se fracturan inmediatamente salen por el cabezal, lo que dificulta llevar todo el parison hasta el picador para obtener los pellets. Se observa que para el lote 3 todos los parisons se fracturan, por lo que en vez de pellets se genera una mayor cantidad de residuos que no logran entrar al picador, conocidos en la industria coloquialmente como “rafia”, teniendo en cuenta que para la extrusión de cada mezcla se utilizó la misma cantidad y calibre de los filtros que se encuentran en el plato del cabezal.

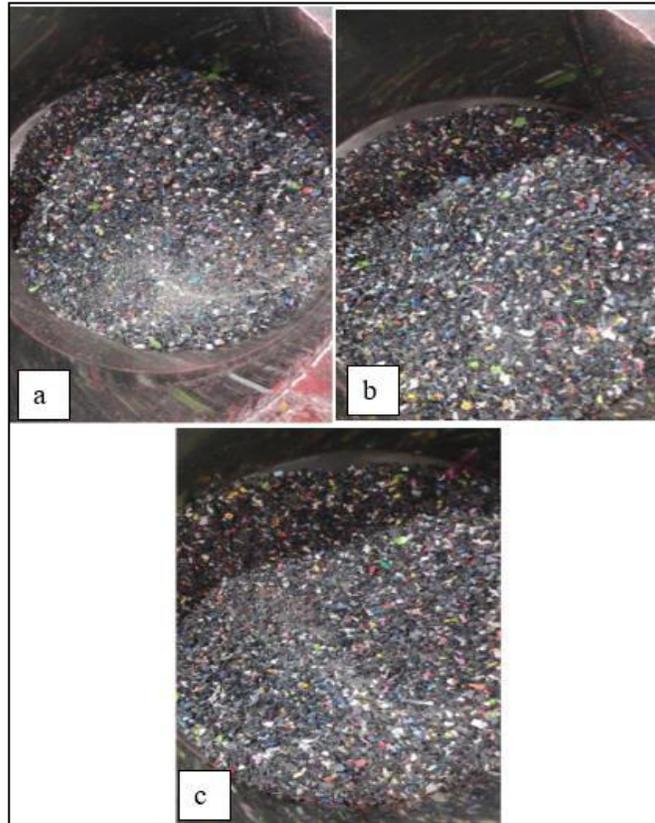


Fig.36. Tolva de la extrusora alimentada con a) mezcla lote 1, b) mezcla lote 2 y c) mezcla lote 3 del material de asiento con el aditivo compatibilizante. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

Las mallas utilizadas como filtros evitan el paso por la boquilla de impurezas presentes en las materias primas. En la figura 38 se muestran dos mallas que filtraron material contaminado de los tres lotes de material de asiento. La figura a) corresponde al filtro de los lotes 1 y 2 que pasaron por la boquilla sin requerir cambio de sistema de filtro. En el momento en que ingresa el lote 3 se requiere cambio de filtro (figura b) debido a que el material no pasa por la boquilla y empieza a salir por el respirador del husillo (figura 39). Los círculos marcados en rojo de la figura 38 indican la presencia de materiales que no lograron ser plastificados por la extrusora y fueron retenidos en el filtro.

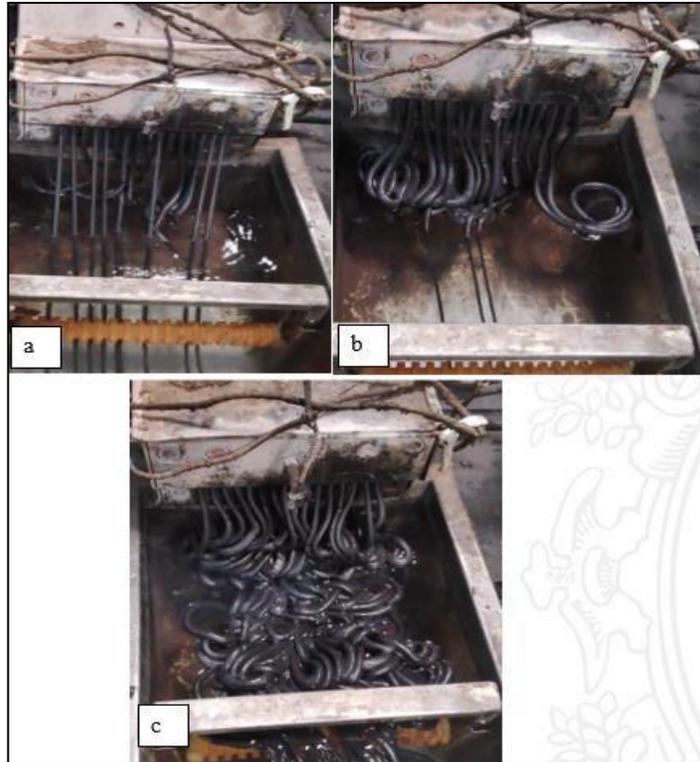


Fig.37. Parisons a la salida del cabezal para a) lote 1, b) lote 2 y c) lote 3. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

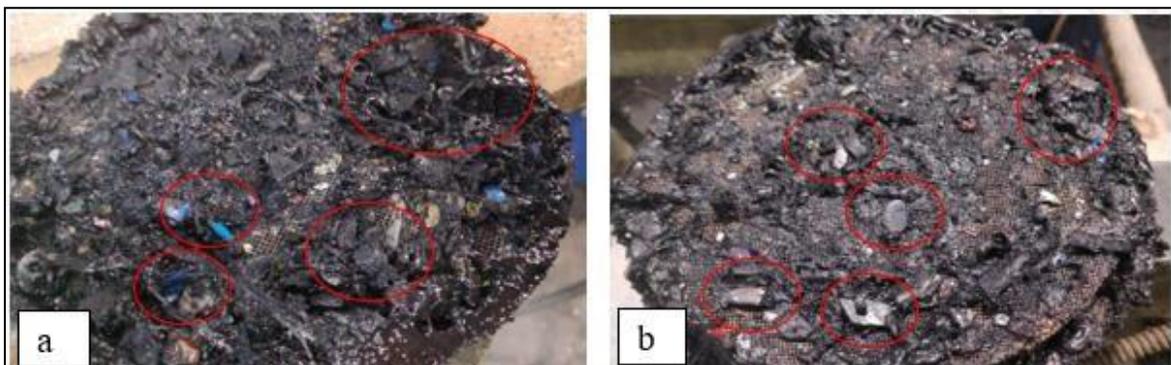


Fig.38. Filtros utilizados para retener impurezas en a) lotes 1 y 2 y b) lote 3. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.



Fig.39. Material plastificado saliendo por el respirador del husillo. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

La figura 40 presenta los pellets obtenidos luego de poner a punto el proceso para cada mezcla de materia prima. Para facilitar el análisis de la morfología y el aspecto de cada uno de los pellets, se incluye un peletizado del portafolio comercial de la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S. como referencia. La apariencia de los pellets de los tres lotes de material de asiento (figuras 40(a); 40 (b) y 40(c)) es similar en geometría y porosidad, dicho defecto corresponde a la presencia de impurezas que no logran ser plastificadas por la extrusora y el filtro ubicado en el plato del cabezal no fue suficiente para impedir su salida por la boquilla y conllevó a obtener pellets con una superficie rugosa. Al comparar la apariencia de los pellets de cada uno de los lotes de material de asiento con los pellets de referencia de Bioplast de Antioquia (figura 40 (d)) se observa una superficie lisa, con una geometría más regular que indica que la materia prima no presentaba impurezas o materiales no plastificador por la extrusora, lo que permite la obtención de pellets de mejor calidad y consistencia.



Fig.40. Apariencia de los pellets obtenidos para a) lote 1, b) lote 2, c) lote 3 y d) referencia. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

El tiempo de residencia y la producción calculada para cada uno de los tres lotes de material de asiento se ilustran en la tabla XI. Se observa que a mayor tiempo de residencia hay una menor productividad obtenida. Es de esperarse que la productividad disminuya conforme aumenta el tiempo de residencia, ya que el tiempo de residencia incide directamente sobre el caudal arrojado por la extrusora. Sin embargo, se debe destacar que tanto los tiempos de residencia como la productividad obtenida para cada mezcla de lote de material de asiento son similares y se debe principalmente a que para las tres mezclas se utilizaron los mismos parámetros de control como perfil de temperatura, velocidad de corte y velocidad de rotación del husillo.

TABLA XI

TIEMPOS DE RESIDENCIA Y PRODUCCIÓN PARA LAS MUESTRAS DE LOS TRES LOTES EVALUADOS.

Lote	Tiempo de residencia (s)	Producción (Kg/h)
1	132	92,3
2	129	94,5
3	137	89,7

Como se indicó anteriormente una dificultad para poner a punto el proceso (figura 36), se tuvo una generación de residuos (normalmente llamado rafia) que lograron salir por el cabezal de la extrusora pero no lograron ser peletizados (figura 41). Dicha rafia debe ser sometida a un proceso de molienda para disminuir su tamaño de partícula y ser incluidos nuevamente para el proceso de extrusión, lo que genera reprocesos y tiempos muertos en la producción.



Fig.41. Rafia generada por la dificultad de poner a punto el proceso de peletización. Foto tomada en la empresa Bioplast de Antioquia S.A.S.

### G. *Inyección de mezclas peletizadas*

El proceso de inyección comienza con la introducción de los pellets a la tolva de alimentación, para que al finalizar el ciclo de inyección se obtengan las primeras probetas. En la figura 42 se presentan las probetas obtenidas para cada uno de los pellets de los tres lotes de material de asiento. Se observa para cada probeta una buena apariencia superficial y sin defectos visibles, lo que indica que los parámetros bajo los cuales se realizó este procesamiento hubo un buen comportamiento en inyección.

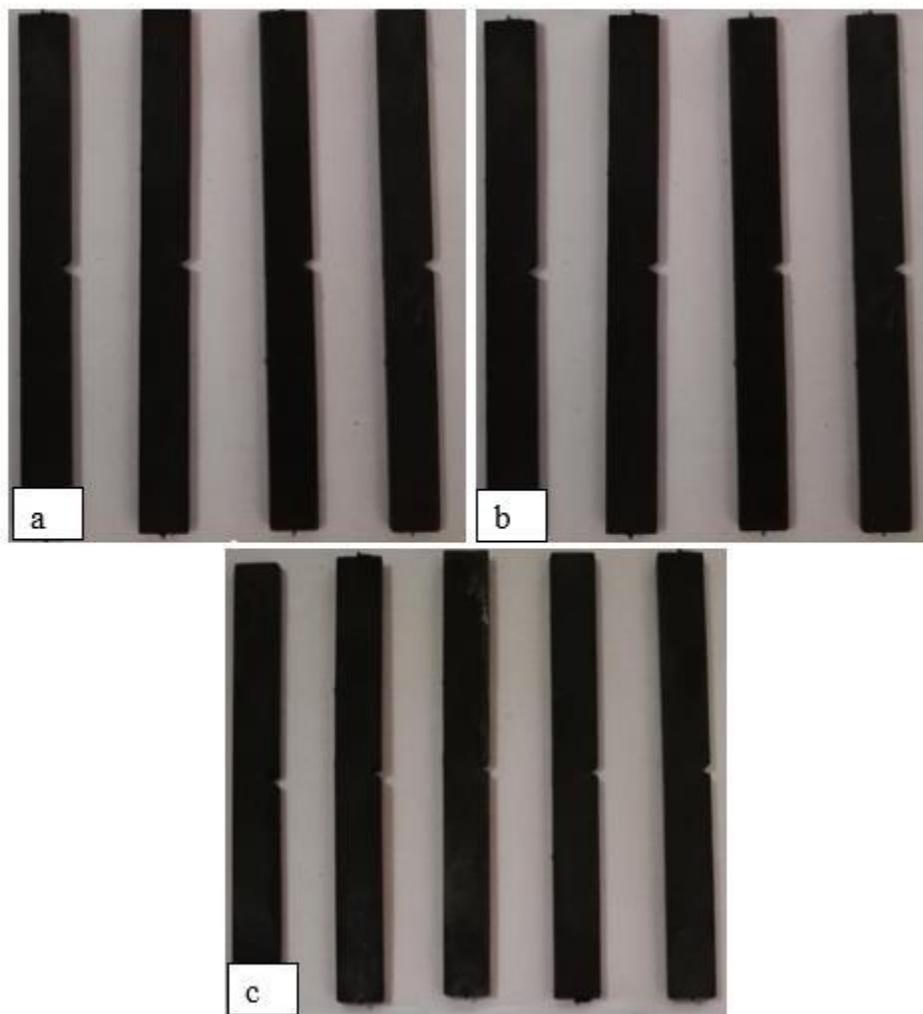


Fig.42. Probetas obtenidas por inyección para a) lote 1; b) lote 2 y c) lote 3.

Las probetas obtenidas para el perfil de temperatura alto realizado para el lote 1 se muestran en la figura 43. Es de notar que también se observa una buena apariencia y que no hay defectos destacables, lo que indica que el aumento en el perfil de temperatura no afectó en la obtención de probetas con igual apariencia superficial que las probetas iniciales con el perfil de temperatura bajo.



Fig.43. Probetas obtenidas por inyección con el perfil de temperatura alto.

Sin embargo, durante el proceso de inyección bajo este perfil de temperatura se observó un desprendimiento bastante abundante de humo que salía por la boquilla de inyección (figura 44) con un olor fuerte e irritante, lo que indica una generación de gases que conlleva a un riesgo alto en la salud del operario sino se usan adecuadamente las herramientas de protección. Adicionalmente, utilizar un perfil más alto de temperatura implica un consumo energético mucho mayor, lo que afecta la rentabilidad.



Fig.44. Humo generado en la boquilla de inyección. Foto tomada en el SENA sede Calatrava- centro de diseño y manufactura del cuero.

## *H. Caracterización del material de asiento peletizado*

### *1. Índice de fluidez*

Los resultados de MFI obtenidos para cada uno de los tres lotes de material de asiento se presentan en la tabla XII. Se destaca que para los tres casos hubo un valor de MFI bastante similar, lo que puede explicarse debido a la homogeneidad que le confiere el proceso de extrusión a estos materiales, de tal manera que el procesamiento por extrusión permitió que para los tres lotes estudiados se estabilizara el flujo. Adicionalmente, estos resultados son coherentes con los resultados obtenidos en la etapa de procesamiento por inyección, ya que hubo un fácil procesamiento bajo los parámetros convencionales para poliolefinas recicladas y los valores de MFI hallados se encuentran dentro del rango que se necesita en MFI para el procesamiento por inyección.

TABLA XII  
 RESULTADOS MFI OBTENIDOS PARA LOS PELLETS DE CADA LOTE DE MATERIAL DE ASIENTO  
 ESTUDIADOS.

Lote	Densidad de fundido (g/cm <sup>3</sup> )	MFI promedio (g/10 minutos)	Desviación estándar (g/10 minutos)
1	0,9244	9,9147	0,9469
2	0,8087	9,7293	1,7472
3	0,8503	9,6810	0,1599

La figura 45 muestra los parisons de cada lote de material de asiento. Se evidencia rugosidad superficial para los tres lotes estudiados que se atribuye a la diferencia entre las transiciones térmicas de los componentes de cada material de asiento tales como la temperatura de fusión de cristales.

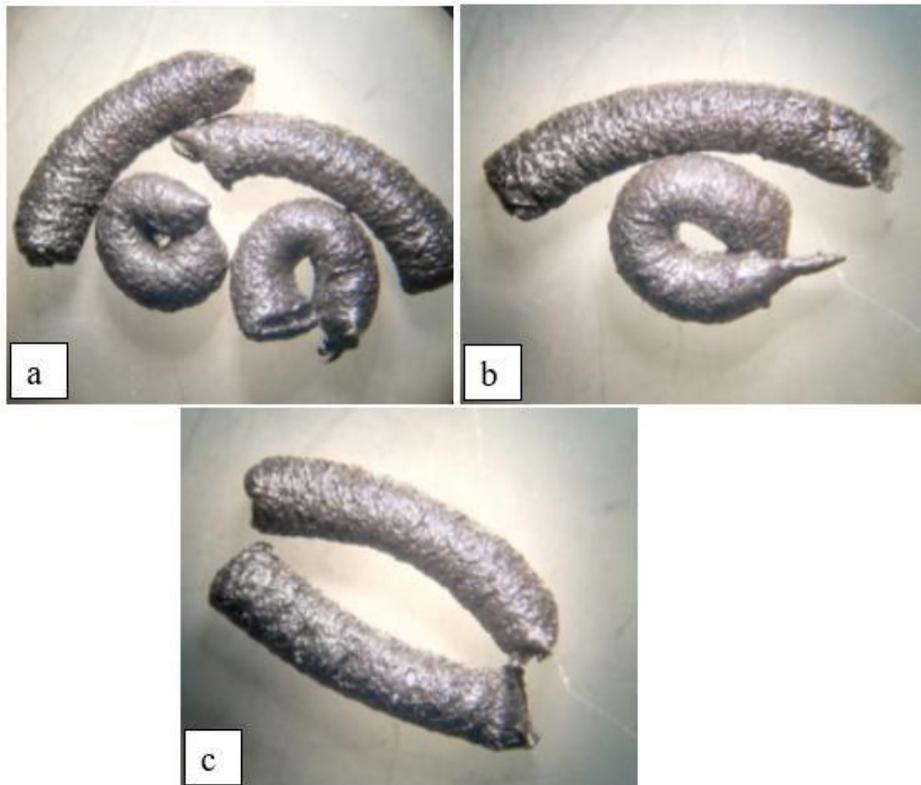


Fig.45. Parisons obtenidos en la prueba MFI de los pellets de a) lote 1; b) lote 2 y c) lote 3. Foto tomada en el laboratorio de Materiales Cerámicos de la Universidad de Antioquia.

## 2. Calcinación

En la figura 46 se muestra el aspecto del residuo generado luego del proceso de calcinación para los lotes de material de asiento. Se trata de un sólido de color blanco y con ciertas zonas donde se percibe aglomeración.



Fig.46. Residuo de calcinación de los pellets de material de asiento. Foto tomada en el Laboratorio de Fundición de la Universidad de Antioquia.

El contenido de este residuo obtenido en cada calcinación se muestra en la tabla XIII. Es importante destacar que dicho porcentaje para los tres casos es coherente con los resultados obtenidos en el análisis por TGA, donde hubo alrededor de un 10 a 15% del material que no logró descomponerse a la temperatura máxima de ensayo (600 °C).

TABLA XIII  
CONTENIDO DE CARGAS OBTENIDAS EN EL PROCESO DE CALCINACIÓN

Lote	Contenido de cargas (%p/p)
1	12,4
2	10,6
3	11,1

### 3. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Los compuestos identificados por análisis FRX se presentan en la tabla XIV. Se trata de óxidos metálicos, en el cual se observa una predominancia para el calcio. Sin embargo, otros tipos de óxidos se encuentran con proporciones considerables, como es el caso del silicio y el magnesio. Otros en proporciones menores como titanio, aluminio y hierro. Todos estos óxidos metálicos forman parte de las cargas minerales presentes en cada uno de los tres lotes de material de asiento estudiados que, posiblemente, son en parte responsables por la dificultad en la procesabilidad de dicho material de interés (especialmente en el procesamiento por extrusión). Dado que en la industria de los plásticos es ampliamente usado el carbonato de calcio como carga, los resultados sugieren que en los residuos de calcinación hay predominancia de dicha carga mineral, pero es necesario realizar análisis complementario como difracción de rayos X, que en este estudio no fue posible realizar dado que el proyecto no contaba con financiación externa.

TABLA XIV  
RESULTADOS FRX PARA LOS RESIDUOS DE CALCINACIÓN

Óxido	% p/p	Óxido	% p/p
CaO	53,48	CuO	0,119
SiO <sub>2</sub>	18,30	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,114
MgO	12,95	PbO	0,100
TiO <sub>2</sub>	5,34	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0569
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,62	SrO	0,0429
Cl	1,68	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0305
SO <sub>3</sub>	1,60	MnO	0,0300
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,51	NiO	0,0207
BaO	1,03	WO <sub>3</sub>	0,0199
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,289	SnO <sub>2</sub>	0,0198
ZnO	0,239	ZrO <sub>2</sub>	0,0179
Br	0,205	MoO <sub>3</sub>	0,0071
K <sub>2</sub> O	0,185	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0024

## CONCLUSIONES

Los diferentes ensayos de caracterización permitieron identificar la presencia de poliolefinas, tales como polipropileno y polietileno de alta densidad lo que indicó que el material de asiento no presentaba una mezcla con termoplásticos como ABS o PET, comunes en la industria del reciclaje, que pudieran dificultar su procesabilidad.

El procesamiento por extrusión permitió identificar partes del material que no fueron plastificadas por el husillo de la extrusora. Apoyados en los resultados obtenidos por TGA y calcinación se identificó un contenido de aproximadamente 10% a 12% en peso de cargas minerales, lo que permitió afirmar que los tres lotes de material de asiento eran una mezcla de poliolefinas con dichas cargas minerales que inciden en la procesabilidad del compuesto. Las cargas presentes en el material de asiento consistieron en óxidos metálicos tales como calcio en mayor proporción; silicio y magnesio en proporciones considerables y titanio, aluminio y hierro en proporciones más bajas, que pueden ser en parte responsables por la dificultad en la procesabilidad de dicho material de interés. Son necesarios estudios más detallados para indagar en la composición de las cargas minerales encontradas en el compuesto, para mejorar aún más la ruta de procesabilidad encontrada en este trabajo.

Se logró procesar por inyección los pellets de material de asiento bajo los mismos parámetros utilizados industrialmente para inyectar polipropileno reciclado, lo que indicó que la dificultad en la procesabilidad del material de asiento fue principalmente en extrusión.

El aditivo utilizado en este trabajo, el cual fue suministrado por la empresa Bioplast de Antioquia no aportó en el procesamiento por extrusión, ya que los resultados obtenidos en esta etapa no fueron favorables y las dificultades para poner a punto el proceso siguen siendo evidentes.

Finalmente, este trabajo sugiere que para futuras investigaciones se realicen pruebas utilizando otros diseños de extrusoras, otros aditivos compatibilizantes disponibles en el mercado y evaluar la efectividad de los diferentes aditivos especialmente en el procesamiento por extrusión.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, pp. 25–29, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [2] M. del P. Noriega, “Recuperación energética de los residuos plásticos: una gran oportunidad,” *Tecnología del plástico*, vol. 31, 2016.
- [3] The World Bank, “Population, total,” 2020. <https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL> (accessed Mar. 27, 2020).
- [4] “Waste Atlas - Interactive map with visualized waste management data.” <http://www.atlas.d-waste.com/> (accessed Mar. 27, 2020).
- [5] M. Margallo, K. Ziegler-Rodriguez, I. Vázquez-Rowe, R. Aldaco, Á. Irabien, and R. Kahhat, “Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support,” *Sci. Total Environ.*, vol. 689, pp. 1255–1275, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.393.
- [6] A. Savino, G. Solórzano, C. Quispe, and M. C. Correal, “Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean,” 2018.
- [7] O. Valerio, R. Muthuraj, and A. Codou, “Strategies for polymer to polymer recycling from waste: Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 25, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1016/j.cogsc.2020.100381.
- [8] Equipo editorial de Tecnología del Plástico, “NOVEDADES EN ADITIVOS Y AYUDAS DE PROCESAMIENTO PARA LA INDUSTRIA PLÁSTICA,” *Tecnología del plástico*, vol. 29, p. 24, 2014.
- [9] Acoplásticos, “Directorio Colombiano de reciclaje de residuos plásticos.” .
- [10] A. Internacional, “ASTM-D883 Standard Terminology Relating to Plastics.” 2020.
- [11] . Laboratorio de Producción, “PLÁSTICOS PROTOCOLO Curso de Procesos de

- Manufactura,” 2007.
- [12] M. del P. Noriega, A. Naranjo Carvajal, and C. R. Correa, *Seminario Materiales Plásticos*. 1993.
- [13] H. Chica Larias and Y. J. Rodriguez Maza, “Diseño Del Proceso De Lavado Y Secado Post-Consumo Para Recipientes De Polipropileno Implementados En La Recolección De Aceite,” Universidad Autónoma del Caribe, 2014.
- [14] F. Muñoz Pinto, “Procesamiento y propiedades de algunas poliolefinas,” *Rev. VirtualPro*, p. 13, 2008, [Online]. Available: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DIC/Fidel.PDF>.
- [15] F. La Mantia, *Handbook of Plastics Recycling*, vol. 53, no. 2. 2002.
- [16] F.-W. Ebeling, H. Huberth, H. Schirber, and N. Schlör, *Ciencia de los plásticos : composición, propiedades, procesamiento, aplicaciones de los termoplásticos, duroplásticos y elastómeros*. 2002.
- [17] T. Osswald, *Ciencia de polímeros para ingenieros/ polymer science for engineers*. 2010.
- [18] J. A. DE SAJA SAEZ, M. L. RODRIGUEZ MENDEZ, and M. A. RODRIGUEZ PEREZ, *Materiales. Estructura, propiedades y aplicaciones*. España, 2005.
- [19] N. Martínez Navarrete, A. M. Andrés Grau, A. Chiralt Boix, and P. F. Maupoey, *Termodinámica y cinética de sistemas de alimento entorno*. 2006.
- [20] METTLER TOLEDO, “Instrucciones de Manejo de Sistema STARe de Mettler Toledo.” p. 75, 2003.
- [21] S. Ebnesajjad, *Surface and material characterization techniques*. Elsevier Inc., 2011.
- [22] D. Jubinville, E. Esmizadeh, S. Saikrishnan, C. Tzoganakis, and T. Mekonnen, “A comprehensive review of global production and recycling methods of polyolefin (PO) based products and their post-recycling applications,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 25, p. e00188, 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00188.
- [23] E. Kosior and J. Mitchell, *Current industry position on plastic production and recycling*. Elsevier Inc., 2020.
- [24] C. A. Ospina Restrepo, “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PERFILES EXTRUIDOS A PARTIR DE MEZCLAS DE POLIMEROS RECICLADOS PARA LA FABRICACION DE ESTIBAS DE MADERAS PLASTICAS EN MADERPOL S.A.S,” 2014.
- [25] L. S. París Londoño and S. M. Gonzáles Villa, “CARACTERIZACIÓN DE LOS

MATERIALES PLÁSTICOS RECICLADOS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA BANANERA EMPLEADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA,” *Supl. la Rev. Latinoam. Metalurgia y Mater.*, vol. 1, no. 4, pp. 1453–1460, 2009.

- [26] P. O. Awoyera and A. Adesina, “Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 12, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00330.
- [27] E. Betancur and C. Giraldo, “Identificación de parámetros de procesamiento para mezclas de polipropileno reciclado convencional con polipropileno suplementario a partir de su caracterización .” pp. 1–11, 2019.
- [28] A. Dorigato, “Recycling of polymer blends,” *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 53–69, 2021, doi: 10.1016/j.aiepr.2021.02.005.
- [29] H. Wang, Y. Zhang, and C. Wang, “Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling——a review,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 226, no. October 2018, pp. 75–94, 2019, doi: 10.1016/j.seppur.2019.05.052.
- [30] Y. B. Zhao, X. D. Lv, and H. G. Ni, “Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review,” *Chemosphere*, vol. 209, pp. 707–720, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.095.
- [31] H. Yuan, S. Fu, W. Tan, J. He, and K. Wu, “Study on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different density,” *Waste Manag.*, vol. 45, pp. 108–111, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.037.
- [32] S. P. Gundupalli, S. Hait, and A. Thakur, “A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling,” *Waste Manag.*, vol. 60, pp. 56–74, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.09.015.
- [33] Y. Zhu, C. Liang, Y. Bo, and S. Xu, “Compatibilization of polypropylene/recycled polyethylene terephthalate blends with maleic anhydride grafted polypropylene in the presence of diallyl phthalate,” *J. Polym. Res.*, vol. 22, no. 3, 2015, doi: 10.1007/s10965-014-0591-4.
- [34] D. Rajasekaran and P. K. Maji, “Recycling of plastic wastes with poly (ethylene-co-methacrylic acid) copolymer as compatibilizer and their conversion into high-end product,” *Waste Manag.*, vol. 74, pp. 135–143, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.018.
- [35] A. Al-Mulla and H. Shaban, “Study on compatibility of recycled polypropylene/high-

- density polyethylene blends using rheology,” *Polym. Bull.*, vol. 71, no. 9, pp. 2335–2352, 2014, doi: 10.1007/s00289-014-1191-5.
- [36] J. . López Bedoya, G. Fonthal, and H. Ariza Calderon, “Análisis de polímeros reciclados mediante calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría,” *Divulg. científica y Tecnológica*, vol. 1, pp. 105–111, 2017, [Online]. Available: 6021\_Revista-2017-v4-definitivo-105-111.pdf.
- [37] A. Schindler, M. Doedt, Ş. Gezgin, J. Menzel, and S. Schmölder, “Identification of polymers by means of DSC, TG, STA and computer-assisted database search,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 129, no. 2, pp. 833–842, 2017, doi: 10.1007/s10973-017-6208-5.
- [38] T. Lozano Ramirez, *Compatibilización de Materiales Plasticos Mezclas PET-HDPE*. 1998.
- [39] S. SolarSKI, M. Ferreira, and E. Devaux, “Characterization of the thermal properties of PLA fibers by modulated differential scanning calorimetry,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 46, no. 25, pp. 11187–11192, 2005, doi: 10.1016/j.polymer.2005.10.027.
- [40] C. Martí Buades, “Caracterización Del Polipropileno De Alto Impacto Con Refuerzos De Diferente Naturaleza Para Aplicaciones En Automoción,” 2014.
- [41] ASTM International, “ASTM D1238-10 Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.” West Conshohocken, PA, 2010, [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [42] J. Velandia, “Identificación de polímeros por espectroscopia infrarroja,” *Rev. Ontare*, vol. 5, pp. 115–140, 2017, [Online]. Available: <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revistao/article/download/2005/1776/>.
- [43] J. F. Bravo Collahuazo, “Evaluación de Propiedades Reológicas y Mecánicas de Polietilenos Reciclados en la Ciudad de Guayaquil,” 2010, [Online]. Available: [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8069/1/Evaluación de Propiedades Reológicas y Mecánicas de Polietilenos.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8069/1/Evaluación%20de%20Propiedades%20Reológicas%20y%20Mecánicas%20de%20Polietilenos.pdf).
- [44] P. A. Rodríguez-bruceta, C. Á. T. Pérez-rodríguez, and J. C. Velásquez-Infante, “Propuesta de un procedimiento para el reciclado del polietileno de alta densidad,” *Rev. Cuba. Química*, vol. 27, no. 1, pp. 32–54, 2015.
- [45] C. Caicedo-Cano, L. M. Crespo-Delgado, H. de la Cruz-Rodriguez, and N. Á. Álvarez-Jaramillo, “Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 18, no. 3, pp. 345–352, 2017, doi:

10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.022.

[46] PerkinElmer, “Polymer characterization.” doi: 10.1201/9780203746684.

[47] E. Rodríguez and E. Villegas, “Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico,” *Métodos y Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–32, 2012, doi: 10.15517/mym.v2i1.13470.