

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN QUÍMICA
COHORTE 2021

Tema: “Obtención de un polímero mixto mediante la mezcla de cáscaras de huevo
de gallina y polipropileno reciclado”

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de
Magister en Química

Modalidad del Trabajo de Titulación: Proyectos de Desarrollo

Autor: Ing. Marlon Jonathan Estrella Semblantes

Directora: Ing. Carolina del Rocío Montero Calderón, PhD

Ambato – Ecuador

2023

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación presidido por: Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Magíster, e integrado por los señores: Química Marcia Eduvijes Buenaño Sánchez, Mg. y Biofísica Rosa Maricela Ormaza Hugo M.Sc. designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “OBTENCIÓN DE UN POLÍMERO MIXTO MEDIANTE LA MEZCLA DE CÁSCARAS DE HUEVO DE GALLINA Y POLIPROPILENO RECICLADO” elaborado y presentado por el Ingeniero Marlon Jonathan Estrella Semblantes, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Química, Mención Química Física; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

.....
Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Magíster.
Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

.....
Química Marcia Eduvijes Buenaño Sánchez, Mg.
Miembro del Tribunal de Defensa

.....
Biofísica Rosa Maricela Ormaza Hugo M.Sc.
Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “OBTENCIÓN DE UN POLÍMERO MIXTO MEDIANTE LA MEZCLA DE CÁSCARAS DE HUEVO DE GALLINA Y POLIPROPILENO RECICLADO”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Marlon Jonathan Estrella Semblantes, Autor bajo la Dirección de: Ing. Carolina del Rocío Montero Calderón, PhD, directora del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

.....
Ing. Marlon Jonathan Estrella Semblantes

c. c. 0504100454

AUTOR

.....
Ing. Carolina del Rocío Montero Calderón, PhD

c.c. : 1717442121

DIRECTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

.....

Ing. Marlon Jonathan Estrella Semblantes

c.c.: 050410045-4

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Portada	i
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	v
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS	ix
AGRADECIMIENTO	x
DEDICATORIA	xi
RESUMEN EJECUTIVO	xii
CAPÍTULO I	14
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1. Introducción	14
1.2. Justificación	15
1.3. Objetivos	16
1.3.1 General	16
1.3.2 Específicos	17
CAPÍTULO II	18
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	18
2.1. La mezcla entre polímeros y carbonato de calcio	18
2.2 Contaminación Ambiental	19
2.2. Plástico	20
2.2.1. Tipos de plásticos	20
2.3 Polímeros	23
2.4. Polipropileno	23
2.4.1. Estructura del Polipropileno	23
2.4.1.1. Propiedades Físicas del Polipropileno	24
2.4.1.2. Propiedades térmicas	25
2.4.1.3. Propiedades mecánicas	25
2.4.1.4. Propiedades químicas	25
2.4.2. Síntesis del Polipropileno	27
2.4.3. Caracterización del Polipropileno	27
2.4.4. Polipropileno Reciclado	29

2.4.5. Procesamiento de Polipropileno reciclados	29
2.5. El huevo de gallina.....	29
2.5.1. Cáscara de huevo de gallina.....	29
2.5.2. Carbonato de Calcio.....	31
2.5.3.1. Usos del Carbonato de Calcio	31
2.5.3.2. Obtención del Carbonato de Calcio	32
2.6. Materiales Híbridos.....	32
2.7. Los Polímeros Mixtos	33
CAPÍTULO III.....	35
MARCO METODOLÓGICO	35
3.1. Tipo de investigación.....	35
3.2. Reactivos, materiales y equipos.....	35
3.2.1. Materiales.....	35
3.2.1. Equipos.	35
3.2.2. Reactivos.....	37
3.3. Materia prima.....	37
3.4. Obtención del polipropileno reciclado.....	38
3.5. Obtención del carbonato de calcio.....	38
3.6. Obtención del polímero mixto.	39
3.7. Análisis del polímero mixto.....	40
3.7.1. Determinación de propiedades mecánicas.	40
3.7.2. Determinación de propiedades térmicas.	40
3.7.2.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	40
3.7.2.2. Análisis termogravimétrico (TGA).	41
3.8. Diseño experimental	42
3.8.1. Enfoque.....	43
3.8.2. Hipótesis.	43
CAPÍTULO IV	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Obtención de polipropileno reciclado.....	44
4.2. Obtención de Carbonato de Calcio.	44
4.3. Preparación del polímero mixto.....	46
4.4. Análisis de las propiedades mecánicas.	47
4.4.1. Análisis estadístico de las propiedades mecánicas.....	48

4.4.1.1 Modulo Elástico.....	49
4.4.1.1.1 Análisis de la varianza del módulo elástico (MPa).....	49
4.4.1.1.2 Método de Tukey.....	50
4.4.1.2. Elongación a la rotura.....	51
4.4.1.2.1. Análisis de la varianza de la elongación a la rotura.....	52
4.4.1.2.2. Método de Tukey.....	52
4.4.1.3. Resistencia a la tracción (MPa).....	53
4.4.1.3.1. Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción.....	54
4.4.1.3.2. Método de Tukey.....	55
4.5. Análisis de las propiedades térmicas.....	55
4.5.1. Análisis estadístico de las propiedades térmicas.....	62
4.5.1.1. Temperatura de transición vítrea (Tg).....	63
4.5.1.1.1. Análisis de la varianza de la temperatura de transición vítrea.....	64
4.5.1.1.2. Método de Tukey.....	65
4.5.1.2. Temperatura de fusión (Tf).....	65
4.5.1.2.1. Análisis de la varianza de la temperatura de Fusión.....	66
4.5.1.2.2. Método de Tukey.....	67
4.5.1.3. Temperatura de descomposición (Td).....	67
4.5.1.3.1. Análisis de la varianza de la temperatura de descomposición.....	68
4.5.1.3.2. Método de Tukey.....	69
4.6. Comparación de resultados para las propiedades mecánicas y térmicas.....	69
CAPÍTULO V.....	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
5.2. Recomendaciones.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXOS.....	80
Anexo A. Repeticiones del análisis DSC para T15 y T30.....	80
Anexo B. Análisis TGA para T15 y T30.....	83
Anexo C. Tabla de cuartiles para la distribución de Tukey.....	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de las propiedades del polipropileno.....	24
Tabla 2 Propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno.....	26
Tabla 3 Comparación nutricional de dos tipos de huevos (blanco y anaranjado).....	30
Tabla 4 Relación másica utilizada para los tratamientos de polímero mixto.....	43

Tabla 5 Resultados de análisis mecánicos para el T15 y T30.....	48
Tabla 6 Resultados del módulo elástico.....	49
Tabla 7 Análisis de la Varianza del Módulo elástico (MPa).....	50
Tabla 8 ANOVA de la varianza módulo elástico (MPa)	50
Tabla 9 Método de Tukey Módulo elástico.	50
Tabla 10 Diferencias Significativas y No Significativas módulo elástico	51
Tabla 11 Resultados de la elongación a la rotura.....	51
Tabla 12 Análisis de la Varianza de la elongación a la rotura.	52
Tabla 13 ANOVA para la elongación a la rotura.....	52
Tabla 14 Método Tukey para la elongación a la rotura.....	53
Tabla 15 Diferencias significativas y no significativas elongación a la rotura.	53
Tabla 16 Resultados de la resistencia a la tracción.	53
Tabla 17 Análisis de la Varianza de la resistencia a la tracción.	54
Tabla 18 ANOVA para la resistencia a la tracción.	54
Tabla 19 Método Tukey para la resistencia a la tracción.....	55
Tabla 20 Diferencias significativas y no significativas resistencia a la tracción.	55
Tabla 21. Repeticiones del análisis T15.....	56
Tabla 22. Repeticiones del análisis T30.....	57
Tabla 23 Resultados para análisis TGA.	62
Tabla 24 Resultados de las temperaturas: Tg, Tf, Td de las muestras T15 y T30.	63
Tabla 25 Resultados de la temperatura de transición vítrea.....	64
Tabla 26 Análisis de la Varianza la temperatura de transición vítrea.	64
Tabla 27 ANOVA de la varianza temperatura de transición vítrea	64
Tabla 28 Método de Tukey temperatura de transición vítrea.....	65
Tabla 29 Diferencias Significativas y No Significativas temperatura de transición vítrea..	65
Tabla 30 Resultados de la temperatura de fusión.....	66
Tabla 31 Análisis de la Varianza la temperatura de fusión.....	66
Tabla 32 ANOVA de la varianza temperatura de fusión.	66
Tabla 33 Método de Tukey temperatura de fusión.	67
Tabla 34 Diferencias Significativas y No Significativas temperatura de fusión.....	67
Tabla 35 Resultados de la temperatura de descomposición.....	68
Tabla 36 Análisis de la Varianza la temperatura de descomposición.	68
Tabla 37 ANOVA de la varianza temperatura de descomposición	68
Tabla 38 Método de Tukey temperatura de descomposición.....	69
Tabla 39 Diferencias Significativas y No Significativas temperatura de descomposición..	69
Tabla 40 Tabla comparativa de propiedades mecánicas y térmicas.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de los plásticos de altas prestaciones.	21
Figura 2 Polipropileno isotáctico.	28
Figura 3 Polipropileno sindiotáctica.	28
Figura 4 Polipropileno atáctico.	28
Figura 5 Diagrama de flujo para obtención de CaCO_3 a partir de cáscaras de huevo.	32
Figura 6 Familias básicas de metales, cerámicas, vidrio, polímeros y elastómeros que pueden ser combinados para crear materiales híbridos.	33
Figura 7 Medidas de probetas de tensión tipo I.	40
Figura 8 Rampa de calentamiento para el análisis DSC.	41
Figura 9 Rampa de calentamiento para el análisis termogravimétrico.	42
Figura 10 Material plástico de polipropileno.	44
Figura 11 Pellets de polipropileno.	44
Figura 12 Materia prima cáscaras de huevo de gallina.	45
Figura 13 Cáscaras de huevo procesadas en mortero.	45
Figura 14 Procesos de tratamiento del polvo de cáscaras de huevo procesadas.	46
Figura 15 Pellets del PP en proceso de calentamiento.	46
Figura 16 Planchas obtenidas de polímero mixto.	47
Figura 17 Análisis DSC muestra T15.	56
Figura 18 Análisis DSC muestra T30.	57
Figura 19 Análisis TGA muestra T15.	60
Figura 20 Análisis TGA muestra T30.	62

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme despertar, disfrutar de un día más de vida y conseguir un nuevo nivel académico y profesional.

A mi madre Yolanda y a mi padre Mario (+) por su gran apoyo y ser mi inspiración para lograr esta meta.

A las instituciones educativas que me facilitaron sus laboratorios para la consecución del proyecto investigativo.

A la PhD. Carolina Montero por su tiempo, colaboración y conocimientos para el desarrollo de este estudio.

Infinitas gracias.

DEDICATORIA

Este nuevo logro se lo dedico a mis familiares, a pesar de los malos momentos y del tiempo alejado de ellos, Dios nos recompensa, en especial a mi madre Yoly y a mi novia Mariana, de corazón gracias por su gran ayuda, por su guía y por su ejemplo. En fin, gracias a todas las personas que conocí dentro de la maestría, cada una aportó con algo específico dentro de las clases y dentro de mi vida.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN QUÍMICA

OBTENCIÓN DE UN POLÍMERO MIXTO MEDIANTE LA MEZCLA DE
CÁSCARAS DE HUEVO DE GALLINA Y POLIPROPILENO RECICLADO.

MODALIDAD DE TITULACIÓN: Proyectos de Desarrollo

AUTOR: Ing. Marlon Jonathan Estrella Semblantes

DIRECTORA: Ing. Carolina del Rocío Montero Calderón, PhD

FECHA: 06 de septiembre del 2023

RESUMEN EJECUTIVO

Los artículos plásticos de un solo uso se han convertido en un grave problema medioambiental a nivel mundial. La presente investigación consiste en la obtención de un material polimérico híbrido mixto, formado por dos sustancias de desecho de uso común: polipropileno reciclado y cáscaras de huevo de gallina, dicho material fue sometido a análisis físico-mecánicos, con el fin de comparar sus propiedades con las del polímero virgen, proponiendo la reutilización de materiales y contribuyendo al cuidado del ambiente. El uso de polipropileno reciclado en forma de pellets aplicando un método de calentamiento controlado permite la reutilización de este como materia prima, la cual, al ser reforzada por un aditivo como el carbonato de calcio, obtenido de las cáscaras de huevo de gallina por medio ácido, presentó resultados interesantes dentro del estudio realizado. Se elaboraron polímeros mixtos utilizando 85:15 y 70:30 en relación másica polipropileno reciclado y carbonato de calcio respectivamente. Se desarrolló un análisis estadístico comparativo por cada propiedad del polímero virgen y los resultados obtenidos en la experimentación de laboratorio, utilizando la media, desviación estándar y método de Tukey, para corroborar las diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Además, se caracterizó los polímeros mixtos mediante técnicas de TGA, DSC para ensayos térmicos según la norma ISO 527 y ensayos físico-mecánicos según la norma ISO 11357. En los ensayos térmicos se obtuvieron valores similares a los bibliográficos mientras que en los ensayos mecánicos se reportó que los resultados para el módulo elástico en el polímero mixto aumentaron al igual que para la

resistencia a la tracción, al contrario de la elongación a la rotura el cual presenta una disminución muy marcada. Algunas propiedades muestran diferencias significativas entre los tratamientos lo cual está directamente relacionado con la adición del polvo de carbonato de calcio dentro del material, el reprocesamiento de este y a que los datos bibliográficos son puntuales, pero en la realidad son rangos de valores dependiendo del fabricante o del tipo de material. El material plástico obtenido presenta cualidades semejantes a las del polipropileno virgen comparadas con los registros en bases de datos electrónicas, siendo una opción viable, de bajo costo y amigable para el ambiente al ser creada de sustancias de desecho.

DESCRIPTORES: *CARBONATO DE CALCIO, PLÁSTICOS, POLÍMERO MIXTO, POLÍMERO VIRGEN, POLIPROPILENO RECICLADO.*

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Los polímeros derivados del petróleo son una fuente de contaminación activa; desde su producción en masa en los años noventa. A partir de su descubrimiento y su aplicación, los polímeros también llamados plásticos han facilitado la vida de las personas en un sin número de aplicaciones a nivel laboral, de entretenimiento, incluso en el área de la salud, entre otras. La producción de plásticos de un solo uso se ha incrementado progresiva y exponencialmente en los últimos 20 años, provocando toneladas de desechos, los cuales tienen como destino final los rellenos sanitarios y en el peor de los casos las fuentes hídricas como ríos, lagos y el mar. Aquellos desechos plásticos utilizados por la sociedad están generando un impacto ambiental gigantesco, según un estudio realizado por la OMS en el año 2017, se registraron en el mar 5 islas de plástico en medio de los 5 continentes, con una extensión de aproximadamente todo el continente de Oceanía (Arroyo et al., 2020).

Ecuador es considerado como un país petrolero, porque su economía depende de la exportación de este a mercados internacionales, a pesar de la explotación y exportación del hidrocarburo, el país no cuenta con procesos enfocados en la transformación del petróleo en derivados como gasolina, diésel y en especial polímeros. Es así como Ecuador importa estos derivados a un mayor costo, como materia prima o como producto terminado, incrementando la problemática ambiental generada por los polímeros, podemos decir que no se cuenta con una ley específica que registre y regule la importación de estos materiales, provocando su consumo masivo en forma de envases, vasos, platos, tarrinas, botellas entre otros (Portilla & Jiménez, 2022).

Según las Fundación World Wild Fund, WWF, (2019) en la región insular Galápagos desde el año 2017, el estado implementó la normativa que prohíbe el uso y venta de productos desechables, entre ellos sorbetes, botellas y fundas plásticas, sentando un precedente para la disminución del consumo de plásticos en el Ecuador. Lastimosamente a nivel general no se da mayor importancia a la disminución del uso de estos elementos. Todos los ciudadanos somos corresponsables en esta grave problemática que consume la biodiversidad y pone en riesgo el medio ambiente.

Por otro lado, el huevo de gallina es uno de los alimentos más consumidos en el país, debido a su bajo costo, sus propiedades nutricionales y su versatilidad en la preparación de recetas. Debido a su alta demanda en los hogares ecuatorianos, se generan gran cantidad de desperdicios luego de su consumo, la cáscara proveniente de los huevos de gallina es desechada en la mayoría de hogares, enviada a rellenos sanitarios y en solo en ciertos casos son utilizadas como abono para las plantas, según la investigación de Bravo, (2021) estas cáscaras contienen 94% de carbonato de calcio (CaCO_3) el cual puede ser utilizado para mejorar las características de ciertos polímeros.

Tomando en cuenta los parámetros antes mencionados, el presente trabajo tuvo como punto central realizar un análisis de las propiedades de un polímero mixto obtenido de polipropileno reciclado y carbonato de calcio (CaCO_3) extraído de las cáscaras de huevo. Es importante mencionar la implementación del CaCO_3 en la matriz polimérica, ya que al ser un compuesto extraído de los desechos de las cáscaras de huevo, este estudio cumple con los requerimientos para la línea de investigación Medio Ambiente dentro del programa de reciclaje de materiales de la maestría en Química.

1.2. Justificación

Los seres humanos durante los últimos años han incrementado la producción de residuos plásticos y orgánicos de manera exponencial, esto genera contaminación en el medio ambiente y también en la salud de los seres vivos. (Bollaín Pastor & Vicente Agulló, 2019).

Los polímeros son materiales utilizados en diversos campos como la construcción, área automotriz, empaques, entre otros, lastimosamente los residuos de estos polímeros terminan su vida útil en vertederos municipales y por esa razón son conocidos como los principales contaminantes ambientales (Rodríguez, 2020).

Por otro lado, los desechos de cáscara de huevo se han catalogado en todo el mundo como un problema ambiental, ya que se encuentran en grandes cantidades, debido principalmente al consumo creciente de este alimento, por su bajo costo y a la vez por su alto aporte nutricional. (Bashir et al., 2017a).

Por este motivo, las investigaciones sobre polímeros mixtos, creados de desechos orgánicos y materiales poliméricos reciclables ha tomado un gran protagonismo en la actualidad. A nivel mundial, existe una creciente búsqueda de nuevos materiales

compuestos, con mejores propiedades y bajo costo (M.&M. J. Jara, 2002). Los materiales compuestos son aquellos que se forman por la combinación de dos o más materiales de diferente naturaleza para conseguir propiedades superiores a las de sus constituyentes (González et al., 2006).

En términos generales, las investigaciones actuales presentan especial interés en la fabricación de compuestos termoplásticos mixtos debido a sus propiedades mecánicas, estabilidad térmica, elasticidad y el reducido costo de producción de estos (Uribe et al., 2011).

Los materiales mixtos reforzados con compuestos de origen orgánico presentan varias ventajas ambientales, como, por ejemplo menor dependencia de fuentes energéticas, menos emisiones de gases contaminantes y mayor degradabilidad al culminar su vida útil (Gómez, 2022).

A nivel global, las investigaciones sobre la adición de compuestos orgánicos han tomado protagonismo, existen varios estudios enfocados a compuestos provenientes de plantas y animales como, por mencionar el lino, yute, cáñamo, cáscaras de huevo, cáscaras de mariscos, los cuales se asocian con todo tipo de polímeros como: polietileno de alta y baja densidad, polipropileno, polivinilcloruro, entre otros. Esto representa una alternativa ecológica y económica a las fibras de adición convencionales como el vidrio y el carbono (Pereira et al., 2015).

A nivel nacional, no existen investigaciones que analicen la estructura y las propiedades de un polímero mixto formado por materiales de desecho como cáscaras de huevo de gallina y polipropileno reciclado. Es aquí donde, radica la importancia del presente estudio, que tiene como objetivo obtener un polímero mixto con buenas propiedades físico-mecánicas, que a futuro pueda ser utilizado para la generación de un nuevo producto, fomentando la reutilización de materiales y aportando a la conservación del medio ambiente.

1.3. Objetivos

1.3.1 General

Obtener un polímero de base mixta, utilizando sustancias de desecho como las cáscaras de huevo de gallina y polímero reciclado, para la comparación de sus propiedades físico-

mecánicas con los polímeros vírgenes.

1.3.2 Específicos

- Extraer el carbonato de calcio de las cáscaras de huevos de gallina para mezclarlo en el polipropileno reciclado, por medio ácido.
- Preparar el polímero mixto con mezclas al 15 y al 30% del polvo de cáscaras de huevo en el polipropileno reciclado.
- Analizar las propiedades mecánicas y térmicas de cada polímero mixto obtenido y comparar los resultados con lo establecido en la norma ISO-527 e ISO-11357 para polipropileno virgen.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1. La mezcla entre polímeros y carbonato de calcio

La mezcla entre polímeros carbonato de calcio proveniente de fuentes naturales de desecho como son las cáscaras de huevo de gallina ha sido un tema muy interesante pero lastimosamente poco estudiado. La matriz polimérica, resultante de este tipo de mezcla, tiene inquietantes propiedades que podrían ser utilizadas a favor de la investigación y la creación de nuevos materiales más resistentes, con mejor elasticidad, mayor resistencia, entre otros; Aquí radica la importancia de la investigación de laboratorio, la propuesta de nuevos compuestos híbridos, la obtención de nuevos conocimientos y que, a su vez, la reutilización de materiales de desecho como las cáscaras de huevo y los plásticos.

A continuación, se presentan algunos artículos relacionados con la mezcla de polímeros y carbonato de calcio proveniente de cáscaras de huevo de gallina.

Según Feng et al. (2014), expone la preparación de compuestos biodegradables a base de PP por el método de colada en solución utilizando cloroformo como solvente es un método viable. Utilizaron carbonato de polipropileno con 1 a 5% en peso de polvo de cáscara de huevo (tamaño de partícula <40 micrómetros). Se encontró que las propiedades de tracción de las películas compuestas eran más altas que las de la matriz de polipropileno puro, las mismas aumentaban con el contenido de polvo de cáscara de huevo hasta un 4% en peso y luego disminuían.

Otra investigación relacionada con la mezcla de polímeros y CaCO_3 , fue la realizada por Shuhadah & Ghani, (2009) en la cual se estudiaron los efectos de la modificación química sobre las propiedades mecánicas, la morfología y la absorción de agua de compuestos de polietileno de baja densidad (LDPE) y polvo de cáscara de huevo (ESP), haciendo énfasis en la introducción de la adhesión interfacial a los compuestos híbridos. Se verificó una mejor adhesión de interacción entre el LDPE y el polvo de cáscara de huevo siendo el responsable directo de la mejora de las propiedades mecánicas del LDPE/ESP, evidenciado por el análisis SEM en la superficie de fractura por tracción de los materiales compuestos.

Bashir et al., (2017), indica que los desechos de cáscara de huevo están disponibles en una gran cantidad como producto del consumo diario y se han catalogado en todo el mundo como uno de los peores problemas ambientales. En dicho estudio se utilizó el

polvo de cáscara de huevo (ESP) como relleno en espuma de látex de caucho natural (NRLF). Los resultados indican que incluso a grandes cantidades de carga de ESP, los rellenos se dispersan homogéneamente en la matriz sin aglomeraciones. Sin embargo, la estabilidad térmica de NRLF disminuye con la incorporación de ESP, como lo indican los resultados de termogravimetría (TGA).

Yew et al., (2013), muestran el efecto de la cáscara de huevo de gallina (ES) como biorrelleno sobre la fuerza de adhesión y la estabilidad térmica de los recubrimientos acrílicos. También, presentan la influencia de diferentes tamaños de partículas de la cáscara de huevo en el desempeño de los recubrimientos acrílicos, se compara con el relleno de carbonato de calcio comercial. Los estudios morfológicos revelan que el relleno se distribuye bien dentro de la matriz polimérica. Finalmente, se muestra como varía la fuerza de adhesión y las propiedades térmicas, aunque el tamaño de la partícula haya sido mayor que el del CaCO_3 comercial.

De acuerdo con Tiimob et al. (2017) en su investigación mostró el efecto del refuerzo de diferentes proporciones de cáscara de huevo/plata (ES-Ag) como nanomaterial, sobre propiedades estructurales y antimicrobianas en la proporción 70/30 poli (butileno adipato tereftalato)/ácido poliláctico (PBAT/PLA). En este estudio las películas delgadas se prepararon utilizando extrusión por fusión e impresión 3D para pruebas mecánicas y antimicrobianas, respectivamente. Dichas películas, mostraron buenas características antimicrobianas debido a la carga de plata, además de una buena resistencia debido a la dispersión homogénea del carbonato de calcio, dentro de la matriz polimérica.

2.2 Contaminación Ambiental

La contaminación se entiende como la introducción de los agentes biológicos, físicos o químicos en el medioambiente, causando daños que pueden ser irreversibles. La contaminación afecta la salud de las personas y mata a millones de personas en todo el mundo cada año, muchas muertes son resultado de enfermedades respiratorias y cardiovasculares causadas por la contaminación del aire o agua. La contaminación como tal, afecta el aire, el agua, el suelo, los efectos electromagnéticos y acústicos (Juliño et al., 2021).

Según la literatura científica se define a la contaminación como la presencia o la introducción de sustancias o elementos tóxicos, nocivos, peligrosos al medio ambiente, dichas sustancias pueden ser dañinas no solo para los ecosistemas (organismos vivos),

sino también para el ser humano, es motivo de preocupación a nivel mundial por su estado de desintegración asociado a ciertas enfermedades, considerando el agua que bebemos todos los días y el aire contaminado que respiramos. De forma general, la contaminación ambiental, determina la alteración del medio ambiente, causando daños menores, severos, o destruyéndolo por completo, cuyo daño puede ser temporal o permanente (Antúnez & Guanoquiza, 2018).

2.2. Plástico

Los plásticos son polímeros sintéticos simples formados por pequeñas moléculas (monómeros) que se repiten y se unen entre sí repetidamente. Presentan propiedades como resistencia a la corrosión, flexibilidad, durabilidad, peso ligero, transparencia y alta versatilidad (Buteler, 2019).

Los plásticos son el nombre común que se le da a los materiales poliméricos, estos pueden ser intencionales o no intencionales, incluidos los rellenos, además, los polímeros plásticos incluyen los tipo sintéticos (orgánicos, inorgánicos e híbridos) y los polímeros semisintéticos en varios estados físicos, solubles en agua y absorbentes de agua (Moon, 2022).

2.2.1. Tipos de plásticos

Los plásticos utilizados más comúnmente son el polietilentereftalato (PET), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno (PE), poliestireno (PS), entre otros.

Se pueden agrupar o clasificar de muchas maneras diferentes, podemos mencionar la propuesta por Brydson (1999), la cual se basa en una evaluación de las características considerando sus usos para el diseño de piezas o aplicaciones específicas.

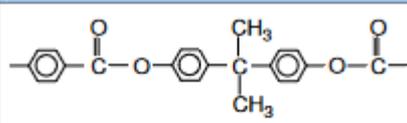
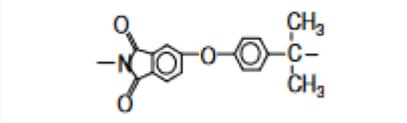
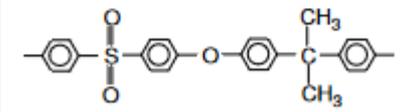
A continuación, se describen los tipos de plásticos más comunes:

- Termoplásticos.- Son polímeros lineales, ramificados o no ramificados. Al no estar reticulados, se disuelven en algunos disolventes orgánicos, son fundibles y, por tanto, altamente reciclables. En comparación con otros tipos de plásticos, los termoplásticos se producen y utilizan en cantidades muy grandes. Los más comunes son los mencionados anteriormente: PP, PE, PVC y PS. Se requiere temperatura para que un polímero se use como termoplástico. La transición vítrea

Tg (para materiales amorfos) o la temperatura de fusión Tm (para materiales cristalinos) está por encima de la temperatura ambiente (Brydson, 1999).

- Plásticos de altas prestaciones.- Son un grupo de termoplásticos caracterizados por muy buenas propiedades mecánicas. En principio, el término "material de altas prestaciones" se utilizó para materiales que bien podrían reemplazar a metales como el aluminio en ciertas aplicaciones. Este tipo de plásticos se obtienen mediante la polimerización de monómeros que incorporan anillos de benceno en la cadena polimérica, estos anillos aromáticos dan rigidez a la cadena y le confieren una temperatura de fusión muy alta, por lo que el plástico puede soportar temperaturas superiores a los 200°C (incluso a los 300°C) durante largos periodos de tiempo conservando sus propiedades mecánicas. Ejemplos de estos materiales son las familias de plásticos de poliimida (PI), poliariletercetona (PAEK), polisulfona (PSU) y poliéster aromático (APE) cuyas estructuras se muestran en la Figura 1. Estos materiales son generalmente más caros y difíciles de procesar que otros termoplásticos (Brydson, 1999)..

Figura 1 Estructura de los plásticos de altas prestaciones.

Polímero	Abreviatura	Estructura
Poliésteres aromáticos	APE	
Poliimidas	PI	
Polisulfonas	PSU	

Fuente: Beltrán & Mancilla (2020).

- Termoestables. - Estos materiales se obtienen a partir de materias primas de bajo peso molecular, los cuales en una primera etapa dan productos intermedios (prepolímeros o termoestables) con escasa o nula reticulación. La reticulación espacial, que conduce a la formación de polímeros termoestables, se produce mediante una reacción química (curado) durante el moldeo de la pieza. No se

funde ni se reblandece, por lo que es un material con muy buenas propiedades a altas temperaturas. Además de la alta resistencia al calor, tiene ventajas que no se encuentran en otros materiales, como alta resistencia química, rigidez, dureza superficial y excelente estabilidad dimensional. Los ejemplos más comunes de estos materiales son los poliuretanos reticulados (PUR), las resinas de fenol-formaldehído (fenoplastos) y las resinas de amina-formaldehído (aminoplastos) (Beltrán & Mancilla, 2020).

- **Elastómeros.-** Los elastómeros o cauchos son generalmente polibutadieno o compuestos que contienen dobles enlaces en el esqueleto, donde la cadena polimérica se enrolla sobre sí misma, lo que le otorga una excelente flexibilidad. La matriz termoplástica funde y moldea el material, y las partículas de caucho le dan dureza y elasticidad al material. En general, la deformabilidad de los elastómeros termoplásticos es menor que la de otros elastómeros (elastómeros permanentes) (Beltrán & Mancilla, 2020).
- **Compositos.-** Son compuestos formados por distintos materiales dentro de una matriz polimérica, los cuales poseen buenas propiedades mecánicas, alta dureza y resistencia a la tracción. Estos materiales consisten en dos componentes inmiscibles que forman dos fases distintas y exhiben propiedades muy interesantes, todo esto, dentro de la matriz que suele ser un polímero termoplástico, vidrio o carbono. Las propiedades de los materiales compuestos dependen no solo de las propiedades de los componentes individuales, sino también del tipo de interfaces Beltrán & Mancilla (2020)..
- **Plásticos espumados.-** Son termoplásticos de estructura celular que contienen una gran cantidad de celdas finas llenas de gas, estas celdas pueden ser cerradas o abiertas. Los métodos para lograr estas estructuras celulares sumergidas en matrices poliméricas se describen en la siguiente sección (agentes espumantes). Las propiedades físicas del material resultante son intermedias entre las de los sólidos y los gases. Para los plásticos espumados, la densidad, la conductividad térmica, las propiedades dieléctricas y la disipación de energía acústica y mecánica se reducen considerablemente. La ley de mezcla se cumple para la mayoría de las propiedades de los plásticos espumados.
- **Cristales líquidos.-** Son termoplásticos basados en poliésteres aromáticos similares a los que se muestran en la Figura 1 y poseen estructuras altamente

ordenadas en al menos una dirección espacial en estado líquido o fundido. Cuando estos materiales están estresados, las moléculas se deslizan entre sí sin perder su estructura ordenada. Esta estructura tan especial proporciona excelentes propiedades térmicas, mecánicas y ópticas. Actualmente son de gran interés ya que representan una amplia gama de aplicaciones tecnológicas, especialmente en dispositivos de visualización gráfica (Beltrán & Mancilla, 2020).

2.3 Polímeros

La denominación polímero proviene del griego; poli “muchos” y mero “unidad fundamental o unidad de repetición”, es decir, muchas unidades que se repiten varias veces. Dentro de un polímero las unidades de repetición forman cadenas extensas conocidas como macromoléculas (decenas de millones de unidades).

Son una serie de macromoléculas orgánicas formadas por la unión de moléculas más simples llamadas monómeros a través de enlaces químicos covalentes. Las estructuras moleculares largas se forman y conectan entre sí por diferentes fuerzas (enlaces de hidrógeno, fuerzas de van der Waals o interacciones hidrofóbicas) (Alvarez, 2021).

2.4. Polipropileno

El polipropileno (PP) es un termoplástico semi-opaco, semicristalino, blanco y comercialmente disponible, actualmente pueden presentarse en distintos grados de cristalinidad o dureza dependiendo de sus variantes. Se considera termoformado o de ingeniería, se utiliza principalmente para construir piezas que requieren resistencia química, peso ligero y poca fricción. Es un material muy duro y rígido con excelente resistencia al impacto, líquidos corrosivos y dieléctricos. El PP es un termoplástico resultante de la polimerización del propileno. Este a su vez es un subproducto gaseoso obtenido de la refinación del petróleo. Por lo tanto, el polipropileno se considera como un derivado del petróleo, el cual se somete a una gran cantidad de procesos antes de convertirse finalmente en plástico (Monzó, 2015).

2.4.1. Estructura del Polipropileno

El PP posee características polimórficas semicristalinas, es cristizable en diversas formas: dependiendo del procesamiento, aditivos, isotacticidad y peso molécula, se pueden

encontrar las formas α , β , γ y meso. Las estructuras cristalinas que conforman un material como el PP se pueden determinar por calorimetría diferencial de barrido (DSC),

Propiedad	Rango de Valores
Densidad	0.855 - 0.946 g/cm ³ (amorfo - cristalino)
Cristalinidad	70 - 80%
Módulo elástico	1300 – 2600 MPa
Elongación	40 – 80 %
Resistencia a la tracción	30 – 60 MPa
Resistencia al impacto	25 – 150 J/m
Dureza Rockwell	95 – 104 R
Temperatura de deflexión	95 – 124 °C
Absorción de humedad	0.03 %
Velocidad a la transmisión de oxígeno	2.4 cm ³ mil/in ² día atm

difracción de rayos X (DRX) o análisis termogravimétrico (TGA). En el caso del PP, la estructura es completamente alifática, es considerado un material combustible debido a que arde rápidamente con llama sin humo y no deja restantes de carbón sólido. Dentro del análisis por pirólisis de dicho polímero se presentan escisiones de cadena, una alta temperatura de auto ignición cercana a los 570°C, una velocidad de descomposición veloz y por ende se comprueba su alta flamabilidad (Merchán, 2016).

2.4.1.1. *Propiedades Físicas del Polipropileno*

Las propiedades físicas más representativas son: densidad, cristalinidad, módulo elástico, resistencia a la tracción, elongación, resistencia al impacto, temperatura de deflexión, dureza Rockwell, velocidad a la transmisión de oxígeno y absorción de la humedad. El rango de valores correspondiente a polipropileno virgen se muestra a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1 *Valores de las propiedades del polipropileno.*

Fuente: Merchán (2016).

Debido a la alta estabilidad de la estructura del PP, se lo puede considerar inerte; además, dicha estructura le concede alta resistencia química con solventes químicos inorgánicos excepto con compuestos orgánicos como los compuestos halogenados y los hidrocarburos aromáticos en altas temperaturas (Merchán, 2016).

2.4.1.2. Propiedades térmicas

Un polímero presenta diferentes propiedades térmicas en relación con el grado de cristalinidad que presente, el punto de fusión, temperatura de transición vítrea, temperatura de ebullición, entre otras.

El PP isotáctico presenta una estructura perfecta, muestra un punto de fusión de 171°C, en contraposición con PP atáctico, el cual es no cristalino y puede presentar puntos de fusión entre 160 y 166°C. La relación entre el porcentaje de cristalización y el punto de fusión es directamente proporcional; es decir, la presencia de un material formado de PP sindiotáctico en un porcentaje de cristalinidad del 30% puede fundir a 130°C. La capacidad para fundirse en altas temperaturas, le concede la aplicación en actividades que impliquen temperatura elevadas que van desde 107-121°C en periodos cortos sin que se pierdan sus propiedades. La temperatura de transición vítrea (Tg) depende de la microestructura, el historial térmico y la velocidad de calentamiento. La Tg es un parámetro de gran utilidad para calcular el volumen útil de un polímero. Los segmentos de las cadenas poliméricas vibran, se dirigen y giran a lo largo de la región amorfa de los materiales poliméricos cuando se supera la temperatura vítrea. Las resinas de pesos moleculares bajos tienen temperaturas vítreas menores, esto se debe al menor entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y el aumento del volumen libre del material. El PP presenta temperaturas de trabajo comprendidas entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión. La dureza de las regiones amorfas dentro del material polimérico se debe a la combinación de la rigidez de la fase cristalina y la resistencia térmica (Caicedo et al., 2017).

2.4.1.3. Propiedades mecánicas

El grado de cristalinidad del polipropileno es la principal propiedad para determinar las propiedades mecánicas del material. Es así como, un incremento de la resistencia a la flexión y la rigidez, pero una disminución de la resistencia al impacto y la dureza, dependen de un aumento del grado de cristalinidad del polímero (Taniike & Terano, 2013).

2.4.1.4. Propiedades químicas

El PP presenta resistencia química mayor, debido a que absorbe agua en mínimas cantidades, casi no absorbe la humedad ambiental. Al ser un material de naturaleza polar

es resistente a varios agentes químicos de tipo inorgánico, el punto de ebullición es aproximadamente de 160°C (Wasiak & Woźniak, 1999).

Las propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno se muestran en la Tabla 2, obtenida de la página web CAMPUS Plastics, la cual es una base de datos que registra los valores de polímeros de varios fabricantes en conjunto con los métodos de ensayo ISO utilizados para su caracterización.

Tabla 2 *Propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno.*

Propiedades	Valor	Unidades	Método de ensayo
Propiedades mecánicas			
Módulo de elasticidad	1746	MPa	ISO 527-1/-2
Resistencia a la tracción	38	MPa	ISO 527-1/-2
Elasticidad	7	%	ISO 527-1/-2
Resistencia al impacto Charpy	34	KJ/m ²	ISO 179/1eU
Propiedades térmicas			
Estabilidad al calor	73	°C	ISO 75-1/-2
Temp. Reblandecimiento Vicat 50 °C	97	°C	ISO 306
Temp. Transición vítrea	-20	°C	ISO 11357-2
Temp. Fusión	173	°C	ISO 11357-3

Temp.	287	°C	ISO 11357
Descomposición			
Otras propiedades	Valor	Unidades	Método de ensayo
Densidad	0.93	g/cm ²	ISO 1183

Fuente: CAMPUS (2023). Revisado el: 30 de julio de 2023.

2.4.2. Síntesis del Polipropileno

El PP se puede sintetizar mediante la polimerización de la molécula de polipropileno, los átomos de monómero se repiten entre 5000 a 20000 unidades. La configuración del grupo metilo unido con cada átomo de carbono secundario puede variar. Cuando todos los grupos metilo están en el mismo lado de la cadena molecular, el producto se conoce como polipropileno "isotáctico". Solo el polipropileno isotáctico cumple con los requisitos básicos para su uso en la fabricación de artículos rígidos. Una estructura estereorregular favorece la formación de dominios cristalinos. Dependiendo de las condiciones de procesamiento, la cristalinidad de la pieza es del 50-70%. Las cadenas moleculares no contienen restos isotácticos y no pueden cristalizarse, por lo que rara vez se integran completamente en dominios cristalinos. Por eso también se le llama "parcialmente cristalino". La estructura cristalina proporciona alta resistencia y rigidez a partir de fuerzas secundarias, mientras que los dominios desordenados amorfos mantienen una alta movilidad (Guapacha et al., 2016).

2.4.3. Caracterización del Polipropileno

La característica principal del polipropileno es el número de átomos de carbono que forman la cadena y el grupo metilo considerado como ramificación.

A partir de esto, se pueden obtener tres isómeros, lo que da lugar a productos con diferentes propiedades en función de la distribución espacial del grupo metilo en la estructura del polímero:

Por un lado tenemos al PP isotáctico, mismo que presenta todas las unidades monoméricas dirigidas hacia un mismo sentido. Un esquema de este se puede observar en la Figura 2.

2.4.4. Polipropileno Reciclado

Las aplicaciones actuales para los polímeros son muy variadas, pero a la vez son considerados un problema ambiental grave, el hecho de poder utilizar polímeros en lugar de utilizar materiales comunes como metales, cerámicos o maderas, han hecho que los polímeros sean una arma de doble filo. Por esta razón la investigación sobre la reutilización de los materiales poliméricos acarrea gran interés en la comunidad científica, quienes han desarrollado nuevas estrategias para reciclar y reutilizar estos elementos. En este caso se hace referencia a la reutilización del material, el cual puede modificar su estructura cuando se combina con otros materiales, en especial fibras vegetales con el fin de reforzar la matriz polimérica y brindarle al nuevo material propiedades diversas e interesantes (Córdoba et al., 2010).

2.4.5. Procesamiento de Polipropileno reciclados

No todos los materiales plásticos son fácilmente reciclables, pero su importancia va en aumento, desde un punto de vista ecológico. Los métodos en el campo del reciclaje pueden ser: primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios. Los primarios tienen que ver con el uso de piezas, sin embargo, los plásticos tienen muchos usos y se obtienen cortando el material de partida. El secundario es el más utilizado, los residuos que se transforman en diversas formas y una gama más amplia de productos con usos diferentes al plástico original. El terciario es un tipo de proceso químicos que utilizan componentes químicos plásticos, como la solvólisis viable o descomposición química, la cual se puede dar por varias vías, incluidas la metanólisis, la aminólisis, el glicólisis y la hidrólisis. Mientras que el cuaternario implica la incineración del polímero para recuperación de energía (Córdoba et al., 2010).

2.5. El huevo de gallina

2.5.1. Cáscara de huevo de gallina

La cáscara es la cubierta exterior del huevo y es muy importante ya que mantiene la integridad física del huevo y actúa como barrera bacteriológica. Está formada por carbonato de calcio (CaCO_3), tiene como misión proteger y aislar el contenido. Tiene miles de poros que permiten el intercambio de gases. Las membranas del huevo están adheridas a la cáscara, que forman una cámara de aire en el extremo del huevo (Cuéllar, 2020).

También contiene otros minerales como sodio (Na), magnesio (Mg), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), aluminio (Al) y boro (B). El caparazón está atravesado por numerosos poros que forman túneles entre los cristales minerales y permiten el intercambio de gases entre el interior y el exterior, su número oscila entre 7.000 y 15.000. Dichos poros son especialmente numerosos en la amplia región polar del huevo donde aparece una celda de aire. El color de la cáscara, que puede ser blanco o marrón según la raza de pollo, depende de la concentración de pigmentos llamados porfirinas que se depositan en la matriz de CaCO_3 y no tiene nada que ver con la calidad el valor nutricional del huevo. Existen diferentes niveles de color según la dieta o el sistema de alimentación cáscara (blanco o marrón) o (huevos coloreados). La calidad y la elasticidad de la cáscara dependen en gran medida del metabolismo mineral del pollo, es decir, de una nutrición adecuada. Otros factores que afectan la calidad son la genética, la salud y la temperatura ambiente. Toda la superficie de la cáscara, incluido el propio poro, está recubierta de una cutícula orgánica compuesta principalmente de proteínas (90 %) y pequeñas cantidades de lípidos y carbohidratos. La función principal de esta película de limo es cerrar los poros y crear una barrera física contra la invasión microbiana, también evita la pérdida de humedad y le da al huevo un aspecto brillante (Mercadé, 2010).

La cáscara de huevo de la cual proviene el CaCO_3 contiene, elementos como el magnesio, cobre, hierro, boro, molibdeno, manganeso, zinc y silicio. La comparación nutricional de dos tipos de cáscaras de huevo se presenta en la Tabla 3:

Tabla 3 Comparación nutricional de dos tipos de huevos (blanco y anaranjado).

Parámetro	Polvo de cáscara de huevo blanca	Polvo de cáscara de huevo anaranjado
Humedad (%)	0.46	0.20
Proteína (%)	3.92	5.04
Ceniza (%)	94.61	94.28
Calcio (%)	34.12	33.13
Magnesio (%)	0.29	0.36
Fósforo (%)	0.04	0.07
Potasio (%)	0.03	0.04
Sodio (%)	0.05	0.04
Cobre (ppm)	< 1 ppm	< 1 ppm

Hierro (ppm)	22 ppm	< 1 ppm
Manganeso (ppm)	< 1 ppm	< 1 ppm
Zinc (ppm)	< 1 ppm	< 1 ppm

Fuente: Rodríguez-Navarro et al. (2002).

2.5.2. Carbonato de Calcio

Es el mineral más abundante en la naturaleza, en el planeta Tierra se halla como mármol y piedra caliza, principalmente se obtiene de la explotación en minas a cielo abierto. Esto, representa ciertas dificultades alrededor de Latinoamérica debido a la minería ilegal, el agotamiento de las canteras y reservas naturales, y las malas prácticas de extracción, lo cual ha generado un preocupante descenso en su producción y comercialización. Por esta razón, se han buscado formas para poder utilizar materiales como conchas y cáscaras de huevo, de los cuales según bibliografía se reporta una concentración aproximada de 95% de CaCO_3 en su composición (Barros et al., 2009).

Las cáscaras de huevo de gallina contienen CaCO_3 mayoritariamente, al ser un desecho no aprovechado, puede tener un potencial de aprovechamiento económico y benéfico desde el punto de vista medio ambiental. Se cree que, en un tiempo no muy lejano este tipo de desechos puede ser procesado a nivel industrial, enfocándolos en insumos de la construcción, en el campo de la biomedicina, mejoramiento de pinturas y los agroinsumos para la estabilización de la acidez del suelo (Radaker, 2022).

2.5.3.1. Usos del Carbonato de Calcio

El carbonato de calcio es considerado un mineral muy útil, por ende, existe gran cantidad de aplicaciones para poder aprovecharlo. Las principales industrias que lo utilizan son la alimenticia, y la del vidrio; también se utiliza dicho agregado en las siguientes áreas enfocadas al papel, cartón, plásticos, pinturas, selladores, artículos escolares, cerámicos, abrasivos, fertilizantes, agregados pétreos, entre otros.

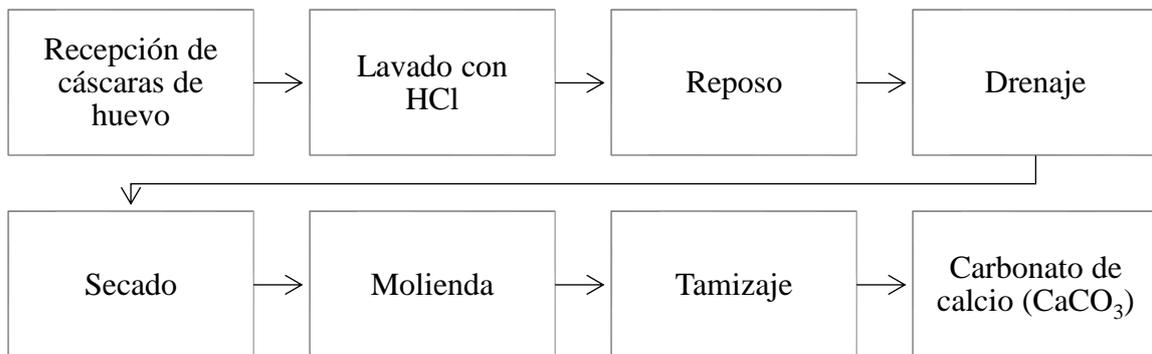
En estas industrias el uso del carbonato ofrece productos con buenas propiedades mecánicas, bajos costos en comparación de otros agregados. Por ejemplo, en la industria del vidrio brinda resistencia, brillo, actúa como fundente y estabiliza la red interna; en el área de producción papelera se utiliza en el papel de escritura e impresión aportando: brillo, opacidad, porosidad, durabilidad y blancura; en la industria del cartón es utilizado como relleno entre los pliegues de la celulosa; en relación con el plástico es utilizado

como carga en el polipropileno, polietileno, PVC y poliestireno, aportando rigidez, dureza, resistencia química, resistencia a la abrasividad, gravedad específica y reducción de costos (Hernández et al., 2014).

2.5.3.2. Obtención del Carbonato de Calcio

Las etapas por seguir para la obtención de CaCO_3 , partiendo de las cáscaras de huevo de gallina consisten en la recepción de los huevos de gallina, pesaje y acondicionamiento, un lavado con ácido clorhídrico con el fin de separar las membranas y residuos del huevo, dejando en reposo un tiempo para su separación, luego se procede a un drenaje del ácido, una vez dejado secar la parte sólida se muele el material, después se tamiza y queda listo para utilizar (Ramírez, 2020).

Figura 5 Diagrama de flujo para obtención de CaCO_3 a partir de cáscaras de huevo.



Fuente: Ramírez (2020).

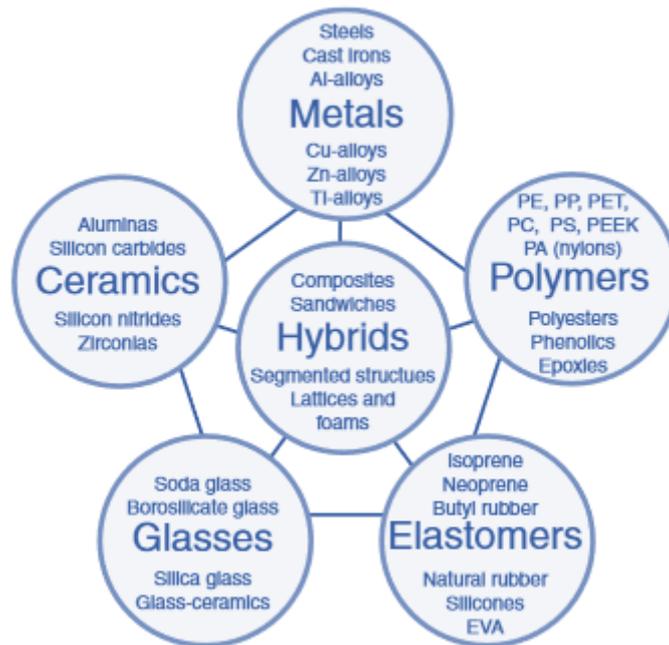
2.6. Materiales Híbridos

La denominación de materiales híbridos hace referencia a la combinación o mezcla de dos o más compuestos, los cuales a una escala adecuada han generado un desempeño positivo en aplicaciones determinadas. También es importante recalcar que algunos compuestos híbridos pueden presentar características especiales como transparencia, durabilidad, homogeneidad molecular y flexibilidad, las mismas que permiten que estos materiales sean utilizados en campos tan amplios como la biología, la mecánica o la electrónica (Núñez, 2014).

La formación de este tipo de materiales permite tener las características específicas de cada elemento, los cuales aportan en la generación de mejores propiedades del material

resultante (Callister, 2007). En la Figura 6 se muestran las familias de compuestos híbridos que se pueden obtener mediante la mezcla de distintos materiales.

Figura 6 Familias básicas de metales, cerámicas, vidrio, polímeros y elastómeros que pueden ser combinados para crear materiales híbridos.



Fuente: Ashby (2005).

2.7. Los Polímeros Mixtos

Los polímeros mixtos han tomado cierta importancia en los últimos años, debido a que la sociedad busca obtener productos con mayor resistencia, más duraderos y con mejores características generales, además de la conciencia ambiental que día a día gana mayor protagonismo. La positiva moda del reciclaje de materiales en especial aquellos reutilizables como los polímeros, ha generado un nuevo campo de investigación, relacionado con los polímeros mixtos, sus nuevas propiedades y la infinidad de posibilidades de mezclas que pueden generarse (Jara et al., 2002).

Según la investigación de los materiales híbridos formados por materiales orgánicos e inorgánicos no son solo la suma de contribuciones individuales sino también de la naturaleza, la morfología y el tamaño de las partículas (Mamede & Sánchez, 2005)

A través de las investigaciones previas realizadas alrededor del mundo, se confirma la importancia del presente estudio puesto que el análisis de los compuestos híbridos y sus

características particulares, muestran una ventana de oportunidades en el campo de los polímeros. Estos materiales han tomado un rol importante en el desarrollo de la sociedad. Además, considerando las implicaciones medioambientales resultantes de la utilización de dos elementos de desecho como son los materiales de PP y el CaCO_3 proveniente de las cáscaras de huevo de gallina, se puede determinar la importancia de unificarlos en proporciones adecuadas y producir un compuesto híbrido con propiedades interesantes.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se muestran los materiales, equipos procesos y reactivos utilizados para la elaboración del proyecto de investigación. A continuación, se describen a detalle las actividades realizadas desde la obtención de los materiales, su tratamiento, hasta la obtención del polímero mixto, así como el proceso para su evaluación en cada uno de los análisis mecánico y químico aplicados.

3.1. Tipo de investigación

El enfoque de la presente investigación de acuerdo con los objetivos propuesto fue mixto (cuantitativa-cualitativa) ya que se realizaron análisis físico-mecánicos y térmicos a los polímeros mixtos obtenidos en el laboratorio y posteriormente se analizaron y compararon los resultados con datos bibliográficos previos.

3.2. Reactivos, materiales y equipos.

3.2.1. Materiales

- Mortero y pistilo.
- Vasos de precipitación de 100 ml, 500 ml y 1000 ml.
- Embudos de vidrio y plástico.
- Soporte universal.
- Recipiente de acero inoxidable de 500ml.
- Termómetros de -20 a 300 °C. Ap. $\pm 1^\circ\text{C}$.
- Cuchara de acero inoxidable
- Pinzas de corte.
- Tamiz N° 10 tamaño de partícula < 2 mm.

3.2.1. Equipos.

- Estufa.
Marca: Binder
Modelo: BD 115.
Rango: (T ambiente – 300) °C
- Balanza
Marca: SCALTEC.

Modelo: SAB 61.

Rango: (0-200)g

Ap. $\pm 0,01$ g

- Plancha de calentamiento
Marca: Thermo Scientific
Modelo: Cimarec
Rango: (50-540) °C
- Pistola de calor
Marca: Qmovil
Modelo: 8586
Especificación: 110V 60Hz, 3.5A, 760W
- Molino de corte.
Marca: RETSCH.
Modelo: SM 300.
Rango: (0.25-20) mm.
(6000-18000) rpm.
- Máquina universal de ensayos.
Marca: Instron.
Modelo: 3365.
- Medidor de espesores con pie de presión plano.
Marca: Mitutoyo.
Modelo: Absolute.
Ap. $\pm 0,001$ mm.
- Calorímetro diferencial de barrido.
Marca: NETZSCH.
Modelo: DSC 3500 Sirius.
Rango = (103-873) K.
Ap. ± 0.1 K
- Balanza analítica.
Marca: Boeco.

Modelo: BAS 31plus.

Rango = (0-220)g.

Ap. $\pm 0,0001$ g.

- Crisoles de aluminio.
Marca: NETZSCH.
- Kit de preparación de crisoles.
Marca: NETZSCH.
- Termobalanza.
Marca: METTLER TOLEDO.
Modelo: TGA 1 STAR.
Rango: [RT-1100 °C] Ap: ± 0.1 K
[$\leq 1/\leq 5$ g] Ap. ± 0.005 %

3.2.2. Reactivos

- Ácido clorhídrico (HCl 10%)
- Cáscaras de huevo de gallina.
- Nitrógeno gaseoso
- Polipropileno reciclado

3.3. Materia prima

Para el desarrollo de la investigación se utilizó material polimérico, 2000 g en total, formado por PP reciclado de categoría 5 en la escala de material reciclable, proveniente de recipientes plásticos como: contenedores, recipientes de limpieza, vasos, tarrinas, platos, tomatodos, entre otros. Estos materiales fueron obtenidos de una recicladora ubicada en la provincia de Cotopaxi, cantón Salcedo.

En el caso de los 500 gramos de carbonato de calcio se obtuvieron de 400 cáscaras de huevo de gallina color naranja provenientes de una panadería, ubicada en la provincia de Cotopaxi, cantón Salcedo.

Se utilizó el HCl como agente limpiador de la materia orgánica de las cáscaras de huevo de gallina.

3.4. Obtención del polipropileno reciclado.

Considerando que las poblaciones de polímeros reciclados se pueden encontrar en grandes cantidades en centros de reciclaje, la muestra representativa se tomó en función de la masa total de la población, y se ejecutó según lo dispuesto en la Norma NTE INEN-ISO 15528, considerando al cuarteo como una técnica para la reducción del tamaño de la muestra.

En el laboratorio de Química de la Unidad Educativa “Santo Domingo de Guzmán” se obtuvo como muestra significativa 930 gramos de PP reciclado en forma de escamas, para este fin se realizaron los siguientes pasos:

Se obtuvo la muestra de material plástico, en este punto se verificó que todos los materiales recolectados tengan el número 5 de categorización para PP en la escala de plásticos. Posterior a esto se removieron las etiquetas y se lavaron los materiales, entre los que se tuvo contenedores, recipientes de limpieza, vasos, tarrinas, platos, tomatodos entre otros, utilizando agua, desinfectante y lavavajillas. Una vez lavados se secaron al sol durante un día. Siguiendo con el proceso se cortaron los materiales plásticos con una pinza cortadora con el objetivo de obtener finas escamas de aproximadamente 10 mm. Finalmente, se pesaron las escamas obteniendo 1000 gramos de material plástico, el cual fue almacenado dentro de un contenedor cerrado del mismo material para evitar contaminación de la muestra.

3.5. Obtención del carbonato de calcio.

Se utilizaron 270 g de polvo obtenido de cáscaras de huevo de gallina, la cual se consideró como una muestra significativa para la mezcla con el polímero reciclado. El procedimiento se lo realizó en el laboratorio de Química de la Unidad Educativa “Santo Domingo de Guzmán”, mediante los siguientes pasos:

Se obtuvo la muestra de las cáscaras de huevo fueron recogidas de una panadería ubicada en la provincia de Cotopaxi, cantón Salcedo, la cual utiliza cerca de 100 huevos de gallina por día en la elaboración de pan y tortas. Se utilizaron las cáscaras de huevo de gallina de cuatro días, 400 cáscaras de huevo aproximadamente. Luego se realizó un lavado de las cáscaras de huevo de gallina con abundante agua. Posteriormente, las cáscaras se colocaron en agua hirviendo para facilitar la separación del material orgánico y demás contaminantes. Se dejaron secar al sol durante dos días. En aquellas cáscaras donde aún se veía la membrana interior pegada, se utilizó un cepillo y ácido clorhídrico al 10%.

Después, se dejaron secar nuevamente las cáscaras al sol por un día. Las cáscaras se colocaron dentro de una estufa a 100°C durante 1 hora para eliminar los restos de agua sobrantes. Una vez las cáscaras secas, se realizó un triturado manual de las cáscaras utilizando un pistilo y un mortero, obteniendo una muestra mixta de polvo y escamas de aproximadamente 2-10 mm. Se utilizó un molino de corte para la homogenización de la muestra obtenida en el paso anterior. Con el polvo de cáscara de huevo obtenido, utilizando un tamiz N° 10 el cual permite el paso de partículas de hasta 2 mm. Finalmente, se realizó un pesaje de la muestra en polvo, obteniendo 500 gramos y se almacenó en un recipiente cerrado de polipropileno para evitar su contaminación.

Según bibliografía la cáscara de huevo reporta una concentración aproximada de 95% de CaCO_3 en su composición (Barros et al., 2009).

3.6. Obtención del polímero mixto.

En las dos muestras de los materiales a utilizar se realizó un pesaje para la primera muestra denominada T15, registrando 85 gramos de material polimérico PP y 15 gramos de polvo de cáscara de huevo. Para la segunda muestra denominada T30, se registraron 70 gramos de material polimérico y 30 gramos de polvo de cáscara de huevo. Dentro de un recipiente de acero inoxidable se colocaron las muestras medidas del PP. Luego el recipiente se colocó en la plancha de calentamiento, la cual fue configurada a una temperatura de 80°C, temperatura a la cual el material polimérico empezó a ablandarse. Utilizando una pistola de calor configurada también a 80°C se suministró calor a la muestra por la parte superior para que la muestra sea homogénea. Una vez la muestra se encuentre homogénea, con forma viscosa parecida a una masa agregar el polvo de cáscara de huevo al recipiente. Después, proceder a mezclar utilizando una cuchara, sin dejar de suministrar calor. Cuando la pasta sea homogénea en su constitución y las partículas del carbonato de calcio se hayan incorporado a la masa, se debe retirar del recipiente y colocar en una plancha de acero inoxidable de 30 cm de alto, 30 cm de ancho por 5 mm de espesor, cubriendo la muestra con otra plancha de similares características. Ambas planchas que contienen la muestra se colocan dentro de una prensa para aplastar la masa hasta un espesor de 3 mm. Se deja enfriar durante 10 minutos y se retira las planchas metálicas. Se realiza el mismo procedimiento por triplicado por cada muestra. Como resultado de este procedimiento se obtuvieron 6 placas en total, con dimensiones: 17 cm de largo, 17 cm de ancho y 3 mm de espesor.

Las muestras T15, T30 y sus réplicas recibieron el mismo tratamiento.

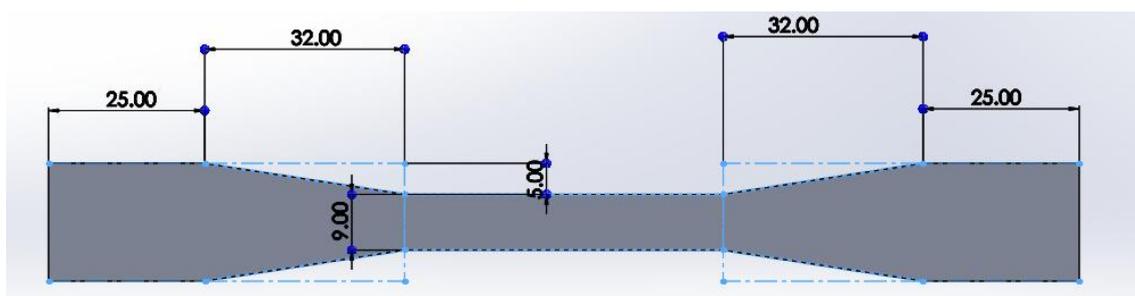
3.7. Análisis del polímero mixto.

3.7.1. Determinación de propiedades mecánicas.

Los ensayos mecánicos para análisis de las muestras de polímeros mixtos se realizaron en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional, procesado en probetas de acuerdo con la norma ASTM D638 mediante los siguientes pasos:

Para el desarrollo del análisis se realizaron probetas de medición según la norma ASTM D638, la cual presenta las siguientes dimensiones mostradas en la Figura 7, con un espesor de $3.2 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ mm}$:

Figura 7 Medidas de probetas de tensión tipo I.



Fuente: (Estrella M., 2023).

Se realizó un corte utilizando una pinza cortadora con las dimensiones de las probetas, se realizaron 5 probetas por cada muestra, 2 probetas sirven para calibrar el equipo y las otras 3 para realizar el promedio y aproximación de los datos obtenidos. Para los ensayos se utilizó la velocidad de deformación de 100 mm/min a temperatura ambiente 25 °C, utilizando una máquina universal de ensayos. Se analizaron los siguientes parámetros: Módulo de elasticidad (MPa), elongación a la rotura (%) y resistencia a la tracción (MPa) (Estrella M., 2023).

3.7.2. Determinación de propiedades térmicas.

3.7.2.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

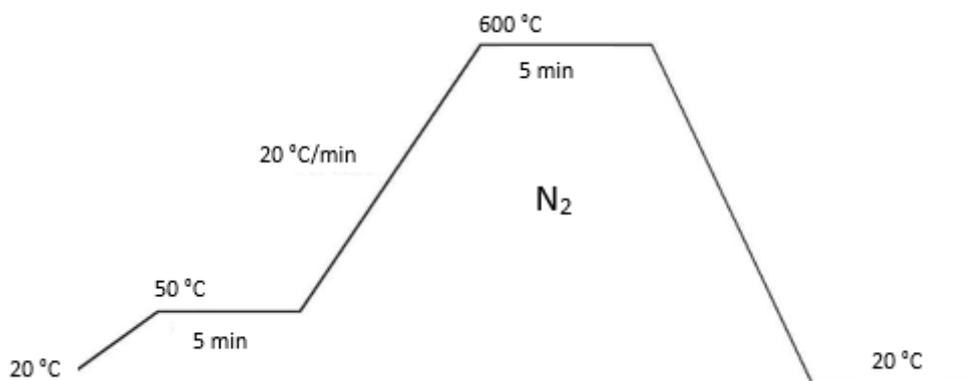
La Calorimetría diferencial de barrido (DSC) permite medir la diferencia entre el flujo de calor de una muestra y otra de referencia en función de la temperatura y el tiempo, con

un programa de temperatura controlada, este análisis se lo realizó en el laboratorio de Investigación de la Universidad Central del Ecuador.

El procedimiento usado para la medición del flujo de calor en la investigación se realizó con los siguientes pasos:

Abrir la llave para el paso del gas nitrógeno y de aire hacia el equipo, luego verificar sus presiones. Encender el Calorímetro y esperar que se estabilice. Luego, preparar el crisol de aluminio vacío (blanco) y registrar su masa. Colocar la muestra de polímero mixto en el crisol de aluminio y registrar la masa de la muestra. Colocar la muestra y el blanco dentro del horno del DSC. Ingresar en el software “DSC 3500 Sirius on USBc 1”. Colocar el método de análisis, el cual consistió en: Configurar el flujo de nitrógeno a 20 mL/min, se utilizó una tasa de calentamiento de 20 °C hasta los 600 °C, según la rampa mostrada a continuación: Las muestras se calentaron desde los 25 hasta los 50 °C, bajo un flujo de nitrógeno con el fin de eliminar el historial térmico de las muestras. La rampa de calentamiento utilizada en el análisis DSC se muestra en la figura 8.

Figura 8 *Rampa de calentamiento para el análisis DSC.*



Fuente: (Estrella M., 2023)

3.7.2.2. Análisis termogravimétrico (TGA).

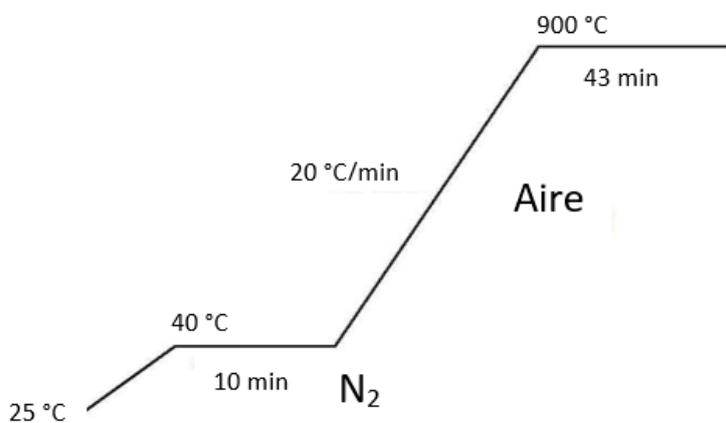
El Análisis termogravimétrico (TGA) permite la cuantificación de la pérdida de masa durante un tiempo en función de la temperatura, la muestra debe ser sometida a una atmósfera específica y a una temperatura programada.

Se utilizó un equipo TGA 1 STAR System de marca METTLER TOLEDO en el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.

Para el análisis termogravimétrico se utilizó la rampa de calentamiento descrito en la Figura 9. El proceso que se llevó a cabo consiste en:

Seleccionar el flujo de nitrógeno en 25 mL/min, tasa de flujo que se mantuvo para toda la experimentación. Luego seleccionar la velocidad de calentamiento de 20 °C/min, la tasa de calentamiento se mantuvo durante toda la experimentación. Programar un proceso dinámico, con una etapa de calentamiento de 25 hasta 40°C. Seleccionar un periodo isotérmico durante 10 minutos. La muestra se somete a una segunda etapa de calentamiento desde los 40 hasta llegar a los 900°C. Es importante recalcar que el método mantiene una atmósfera inerte y un caudal constante, por esta razón al terminar los experimentos el minicrisol contiene residuos de cenizas y carbono sin combustionar.

Figura 9 Rampa de calentamiento para el análisis termogravimétrico.



Fuente: (Estrella M., 2023)

3.8. Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial experimental de dos factores con tres réplicas, este tipo de diseño se utiliza para experimentos con dos o más factores, dado que en general son los más eficientes para ello. Para el análisis de las propiedades físico-mecánicas de cada polímero mixto obtenido, se realizó un análisis de los resultados, análisis de varianza, obteniendo así una diferencia significativa a través del método LSD de Tukey el cual hace uso de comparaciones múltiples para evaluar las diferencias en las medias de grupos,

finalmente se estableció un cuadro comparativo entre los resultados de los polímeros mixtos obtenidos y los datos del PP virgen establecidos bajo la norma ISO correspondiente. Se muestra la Tabla 4 con los factores porcentajes de polipropileno reciclado (PPr), CaCO₃ y las variables de respuesta polímero mixto con sus propiedades:

Tabla 4 *Relación másica utilizada para los tratamientos de polímero mixto.*

	PP reciclado	CaCO ₃	Polímero mixto
Relación másica 1 (T15)	85 %	15 %	100 %
Relación másica 2 (T30)	70 %	30 %	100 %

Fuente: (Estrella M., 2023)

Para la evaluación del diseño de experimento se utilizó el programa estadístico SPSS.

3.8.1. Enfoque.

El enfoque es mixto (cuantitativa-cualitativa) ya que se consideró el análisis físico-mecánicos y térmicos del polímero mixto y la recopilación de información de fuentes bibliográficas. Se desarrolló un análisis individual comparativo por cada propiedad del polímero virgen, considerando lo obtenido en bibliografía y los resultados de la experimentación en el laboratorio, se utilizaron análisis estadísticos de la media, desviación estándar y Tukey, para corroborar la diferencia significativa entre los tratamientos aplicados en el software SPSS.

3.8.2. Hipótesis.

Hipótesis alternativa (H_A)

Es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado.

Hipótesis nula (H₀)

No es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado.

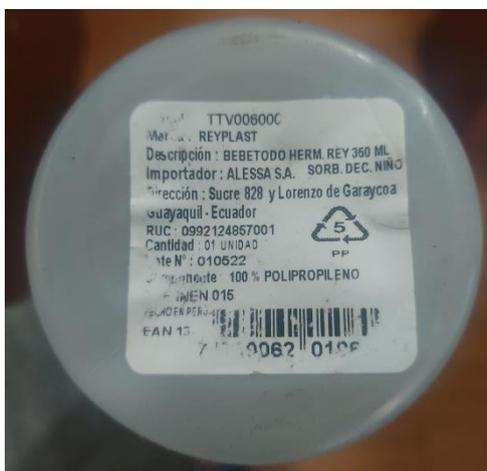
CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención de polipropileno reciclado.

Se obtuvieron 2000 g de material polimérico categoría 5 en la escala de reprocesamiento de polímeros como se observa en la Figura 10. Luego del procesamiento del PP utilizando una pinza se cortó hasta conseguir piezas (pellets) de aproximadamente 10 mm de tamaño. A continuación, la Figura 11 muestra los pellets obtenidos.

Figura 10 *Material plástico de polipropileno.*



Fuente: (Estrella M., 2023)

Figura 11 *Pellets de polipropileno.*



Fuente: (Estrella M., 2023)

4.2. Obtención de Carbonato de Calcio.

La Figura 12 muestra la materia prima utilizada para la obtención del carbonato de calcio partiendo de cáscaras de huevo de gallina. La Figura 13 presenta el proceso de trituración

de las cáscaras de gallina de forma manual utilizando un mortero y pistilo, hasta un tamaño de partícula de 2 mm hasta 10 mm. La Figura 14 se observa el polvo obtenido luego del proceso de triturado en el molino de corte (0.25-20) mm y su posterior tamizado hasta un tamaño de 2 mm.

Figura 12 *Materia prima cáscaras de huevo de gallina.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

Figura 13 *Cáscaras de huevo procesadas en mortero.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

Figura 14 *Procesos de tratamiento del polvo de cáscaras de huevo procesadas.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

4.3. Preparación del polímero mixto.

Se obtuvieron 6 planchas en total, con dimensiones: 17 cm de largo, 17 cm de ancho y 3 mm de espesor. En la Figura 15 se muestra los pellets de polipropileno en proceso de calentamiento utilizando un recipiente de acero inoxidable, pistola de calor y plancha de calentamiento a 80 °C.

Figura 15 *Pellets del PP en proceso de calentamiento.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Figura 16 se presentan las planchas obtenidas luego del calentamiento, añadimiento del polvo de carbonato de calcio y posterior prensado entre dos láminas de acero inoxidable.

Figura 16 *Planchas obtenidas de polímero mixto.*



. Fuente: (Estrella M., 2023).

Finalmente, una vez elaboradas las planchas de material polimérico se las dejó enfriar a temperatura ambiente durante un día antes de realizar los análisis mecánicos y térmicos.

El material polimérico mixto obtenido presenta coloración gris claro, esto se debe a la combinación de distintos materiales formados de polipropileno con diferentes colorantes, a pesar de eso el color predominante se debe al color de las tarrinas grises de PP, además, las láminas poseen firmeza, espesor homogéneo de 3 mm excepto en los bordes donde llega a una medición hasta de 1 mm aproximadamente, también muestra flexibilidad media y cierta ductilidad.

Las planchas obtenidas de material polimérico mixto presentan características similares a las presentadas por Feng et al., (2014) donde se obtuvieron películas compuestas formadas por polvo de cáscara de huevo y PP en relación 1 a 5 % utilizando cloroformo como solvente, además se aplicó el método de colado. Las láminas poseen buena flexibilidad y grietas mínimas, además de una buena dispersión del CaCO_3 . Los resultados de dicha investigación muestran que la dispersión del aditivo en la matriz afecta las propiedades mecánicas y están influenciadas por el tamaño de partícula utilizada para la obtención de las muestras. Se puede decir que en base a estos resultados, las grietas observadas en nuestra muestra se podría asociar a la dispersión del aditivo, pues esto afectaría de forma directa las propiedades mecánicas y se vería influenciado por el tamaño de partícula de las muestras usadas.

4.4. Análisis de las propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas del polímero virgen fueron obtenidas de los datos publicados por CAMPUS Plastics, (2023) el cual es una biblioteca virtual que recopila la información de varios proveedores de materiales plásticos a nivel mundial los cuales fueron registrados en la Tabla 2 Propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno.

Las muestras T15 y T30 fueron obtenidas según las especificaciones de la Tabla 4 considerando la relación másica utilizada para los diferentes tratamientos. Es importante mencionar que los análisis mecánicos se realizaron troquelando 5 probetas de cada tratamiento según la norma ASTM D368, resultados registrados en la Tabla 5:

Tabla 5 Resultados de análisis mecánicos para el T15 y T30.

No.	ID Muestra	No. Probeta	Módulo elástico [MPa]	Elongación a la rotura [%]	Resistencia a la tracción [MPa]
1	T15	1	2602	1,3	32,9
		2	2642,6	1,3	32,5
		3	2692,5	1,3	33,2
		4	2685,1	1,3	32,9
		5	2692,3	1,3	33,2
2	T30	1	2883,3	1,4	41,1
		2	2981,9	1,4	42
		3	3024,5	1,5	43,6
		4	3131	1,5	44,1
		5	3128,6	1,5	43,9

Fuente: (CIAP, 2023).

En la Tabla 5, se puede apreciar los resultados para los 3 análisis mecánicos realizados para cada tratamiento, evidenciando que existe un incremento en el valor promedio del módulo elástico, elongación a la rotura y resistencia a la tracción, esto al comparar los dos tratamientos, lo cual se podría relacionar directamente con el aumento de la concentración del polvo de carbonato de calcio en la mezcla.

4.4.1. Análisis estadístico de las propiedades mecánicas.

Para la validación y comprobación de la hipótesis se realizó un análisis de varianza, y la prueba Tukey para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos T0, T15 y T30, utilizando el programa estadístico SPSS.

La investigación obtuvo 6 propiedades, a continuación, se procede con la determinación del análisis estadístico de la varianza y de las diferencias significativas para cada resultado. Se trabajó con las siguientes abreviaturas:

k	Número de tratamientos
N-k	Grados de libertad para el error
CM _E	Cuadrado de medio del error
n _i	Número de observaciones por tratamiento
q _α (k,N-k)	Son puntos porcentuales de la distribución del rango estudentizado, que se obtienen de la tabla.

T_{α} = Método Tukey
 MPa Megapascales
 $q(n, m)$. Valor de la tabla de cuartiles de Tukey

Finalmente, se comprobó el valor en la tabla de cuartiles de la distribución de Tukey, la cual se muestra en el Anexo C1:

4.4.1.1 Modulo Elástico.

En la Tabla 6, se muestran los valores resultantes de los tratamientos aplicados a los polímeros mixtos, análisis del módulo elástico (MPa).

Tabla 6 Resultados del módulo elástico.

Módulo elástico (MPa)			
Réplicas	T0	T15	T30
R1	1746	2602	2883.3
R2	1746	2642.6	2981.9
R3	1746	2692.5	3024.5
R4	1746	2685.1	3131
R5	1746	2692.3	3128.6
Suma(x_i)	8730	13314.5	15149.3
Promedio	1746.0	2662.9	3029.9
Des. Estándar	0	39.86	104.63

Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 6 se muestran los resultados del análisis del módulo elástico (MPa), se observa que, el tratamiento T30 es el que tiene mayor valor (3029.0 ± 104.63), seguido por el T15 con un valor de 2662.9 ± 39.86 y por último el T0 (polímero virgen) con un valor de 1746.0 ± 0 .

4.4.1.1.1 Análisis de la varianza del módulo elástico (MPa).

En la Tabla 7 se muestran los valores del análisis de la varianza para el módulo elástico de las muestras T0, T15 y T30.

Tabla 7 *Análisis de la Varianza del Módulo elástico (MPa).*

Resumen Análisis de Varianza				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T0	5	8730	1746	0
T15	5	13314.5	2662.9	1588.565
T30	5	15149.3	3029.86	10946.903

Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 8 *ANOVA de la varianza módulo elástico (MPa)*

ANOVA módulo elástico						
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4372769.5 9	2	2186384.7 9	523.24766 6	2.12302E- 12	3.8852938 3
Dentro de los grupos	50141.872	12	4178.4893 3			
Total	4422911.4 6	14				

Fuente: (Estrella M., 2023).

Considerando los datos obtenidos del análisis de la varianza del módulo elástico (Tabla 7), se procedió a determinar un Anova, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 8. Se observa que el F calculado es mayor que el valor F crítico, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que dice “es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado”.

4.4.1.1.2 Método de Tukey.

El método Tukey es utilizado para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores. En la Tabla 9 se presentan los valores calculados para el módulo elástico utilizando el método de Tukey.

Tabla 9 *Método de Tukey Módulo elástico.*

Método de Tukey	
k	3
N-k	12

CM_E	4178.5
n_i	5
$q_{\alpha}(k, N-k)$	3.77
$T_{\alpha=}$	108.98

Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 10 *Diferencias Significativas y No Significativas módulo elástico*

Diferencias Significativas y No Significativas		
Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
$\mu T0 - \mu T15$	916.90	Diferencia significativa
$\mu T0 - \mu T30$	1283.86	Diferencia significativa
$\mu T15 - \mu T30$	366.96	diferencia significativa

Fuente: (Estrella M., 2023)

Se puede observar en la Tabla 10 todas las comparaciones posibles para los tratamientos, dando como respuesta que se presentan diferencias significativas entre todos los tratamientos.

4.4.1.2. Elongación a la rotura.

En la Tabla 11, se muestran los valores resultantes de los tratamientos aplicados a los polímeros mixtos, análisis de elongación a la rotura (%).

Tabla 11 *Resultados de la elongación a la rotura.*

Elongación a la rotura (%)			
Réplicas	T0	T15	T30
1	7	1.3	1.4
2	7	1.3	1.4
3	7	1.3	1.5
4	7	1.3	1.5
5	7	1.3	1.5
Suma(x_i)	35	6.5	7.3
Promedio	7.0	1.3	1.5
Des. Estándar	0	0	0.05

Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 11 se muestran los resultados del análisis del módulo elástico (MPa), se observa que, el tratamiento T0 es el que tiene mayor puntaje 7.0 ± 0 , seguido por el T30 con un valor de 1.5 ± 0.05 y por último el T15 con un valor de 1.3 ± 0 .

4.4.1.2.1. Análisis de la varianza de la elongación a la rotura.

La Tabla 12 muestra los resultados del análisis de la varianza para la elongación a la rotura de las tres muestras: T0, T15 y T30.

Tabla 12 *Análisis de la Varianza de la elongación a la rotura.*

Resumen Análisis de Varianza				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T0	5	35	7	0
T15	5	6.5	1.3	0
T30	5	7.3	1.46	0.003

Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 13 *ANOVA para la elongación a la rotura.*

ANOVA elongación a la rotura						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	105.345333	2	52.6726667	52672.6667	2.1832E-24	3.88529383
Dentro de los grupos	0.012	12	0.001			
Total	105.357333	14				

Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 13, se observa que el F calculado es mayor que el valor F crítico, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que dice “es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado”.

4.4.1.2.2. Método de Tukey.

La Tabla 14 presenta el cálculo para la elongación a la rotura utilizando el método de Tukey.

Tabla 14 Método Tukey para la elongación a la rotura.

Método de Tukey	
k	3
N-k	12
CM _E	0.00100
n _i	5
q _α (k, N-k)	3.77
T _α	0.05

Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 15 Diferencias significativas y no significativas elongación a la rotura.

Diferencias Significativas y No Significativas		
Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
μ T0 - μ T15	5.70	Diferencia significativa
μ T0 - μ T30	5.54	Diferencia significativa
μ T15 - μ T30	0.16	Diferencia significativa

Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 15 se puede observar que se presentan diferencias significativas entre todos los tratamientos, este resultado infiere que la elongación a la rotura cambia en comparación de los tratamientos T0, T15 y T30.

4.4.1.3. Resistencia a la tracción (MPa)

La Tabla 16 muestra los valores resultantes de los tratamientos aplicados a los polímeros mixtos, análisis de resistencia a la tracción medido en (MPa).

Tabla 16 Resultados de la resistencia a la tracción.

Resistencia a la tracción (MPa)			
Réplicas	T0	T15	T30
1	38	32.90	41.10
2	38	32.50	42.00
3	38	33.20	43.60
4	38	32.90	44.10
5	38	33.20	43.90
Suma(x _i)	190	164.7	214.7
Promedio	38.0	32.9	42.9
Des. Estándar	0	0.29	1.22

Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 16 se muestran los resultados del análisis del módulo elástico (MPa), se observa que, el tratamiento T30 es el que tiene mayor puntaje 42.9 ± 1.22 , seguido por el T0 con un valor de 38 ± 0 y por último el T15 con un valor de 32.9 ± 0.29 .

4.4.1.3.1. Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción.

La Tabla 17 muestra el análisis de la varianza para la resistencia a la tracción de las muestras: T0, T15 y T30.

Tabla 17 Análisis de la Varianza de la resistencia a la tracción.

Resumen Análisis de Varianza				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T0	5	190	38	0
T15	5	164.7	32.94	0.083
T30	5	214.7	42.94	1.743

Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 18 ANOVA para la resistencia a la tracción.

ANOVA resistencia a la tracción						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	250.012	2	125.006	205.37678	5.2307E-10	3.88529383
Dentro de los grupos	7.304	12	0.60866667			
Total	257.316	14				

Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 18, se observa que el F calculado es mayor que el valor F crítico, con esto podemos decir que la combinación T15 y T30 son los tratamientos con mejores resultados, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que dice “es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado”.

4.4.1.3.2. Método de Tukey.

La Tabla 19 presenta el cálculo para la resistencia a la tracción utilizando el método Tukey.

Tabla 19 Método Tukey para la resistencia a la tracción.

Método de Tukey	
k	3
N-k	12
CM _E	0.6
n _i	5
q _α (k, N-k)	3.77
T _α	1.32

Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 20 Diferencias significativas y no significativas resistencia a la tracción.

Diferencias Significativas y No Significativas		
Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
μ T0 - μ T15	5.06	Diferencia significativa
μ T0 - μ T30	4.94	Diferencia significativa
μ T15 - μ T30	10.00	Diferencia significativa

Fuente: (Estrella M., 2023).

Se puede observar en la Tabla 20 que se presentan diferencias significativas entre todos los tratamientos.

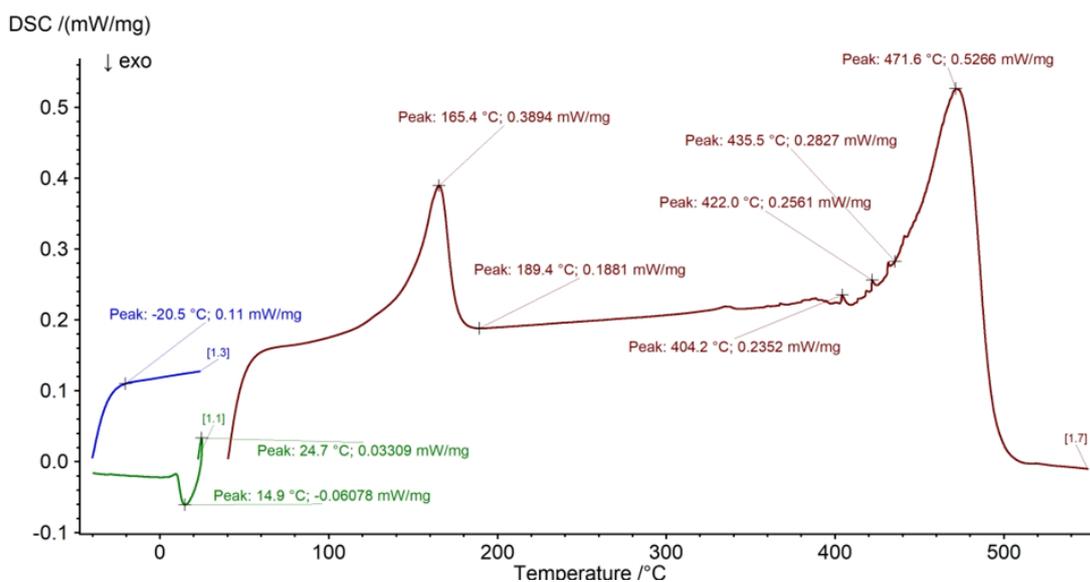
4.5. Análisis de las propiedades térmicas.

El análisis térmico para el estudio se realizó utilizando la calorimetría diferencial de barrido, con esta se obtuvo las T_g, T_f y T_d para ambas muestras. Además, se realizó un análisis termogravimétrico para comprobar las pérdidas de masa en los materiales poliméricos. El análisis térmico por la técnica de calorimetría diferencial de barrido permitió encontrar cambios entre las propiedades físicas y químicas de las muestras de polímero mixto sintetizados en función de la cantidad de polipropileno y carbonato de calcio utilizado.

Para la muestra T15, se presenta en la Figura 17 el resultado del análisis DSC de la muestra. Se determina los datos de temperatura medida en °C vs el flujo de calor medido en mW/mg.

En el primer ensayo (T15), la curva DSC muestra pérdidas de masa lo cual está asociado a procesos endotérmicos. Un proceso exotérmico se registra a una temperatura de 14.9 °C al inicio del análisis durante el proceso de enfriamiento del material el cual va desde los 25 hasta los -40 °C, esto se lo realiza con el objetivo de borrar el historial térmico del polímero. En el segundo proceso (calentamiento) comprendido en el intervalo de los -40 hasta los 25°C encontramos una desviación de la gráfica correspondiente a la temperatura de transición vítrea (Tg), esta se muestra a un valor de -20.5°C. Luego se observa un tercer proceso de calentamiento en el intervalo de 40 °C hasta los 600 °C, donde encontramos la temperatura de fusión en un valor de 165.4 °C. Finalmente, encontramos la temperatura de descomposición (Td) sobre los 400 °C en la cual se rompen los enlaces covalentes que forman al polímero, resultados que coinciden con los presentados por Merchán (2016).

Figura 17 *Análisis DSC muestra T15.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 21 se muestran los resultados de las tres réplicas aplicadas al T15.

Tabla 21. *Repeticiones del análisis T15.*

T15	Tg (°C)	Tf (°C)	Td (°C)
R1	-19.0	164.4	471.6
R2	-19.7	164.4	477.9
R3	-21.4	165.8	447.6
Promedio	-20.03	164.87	465.7

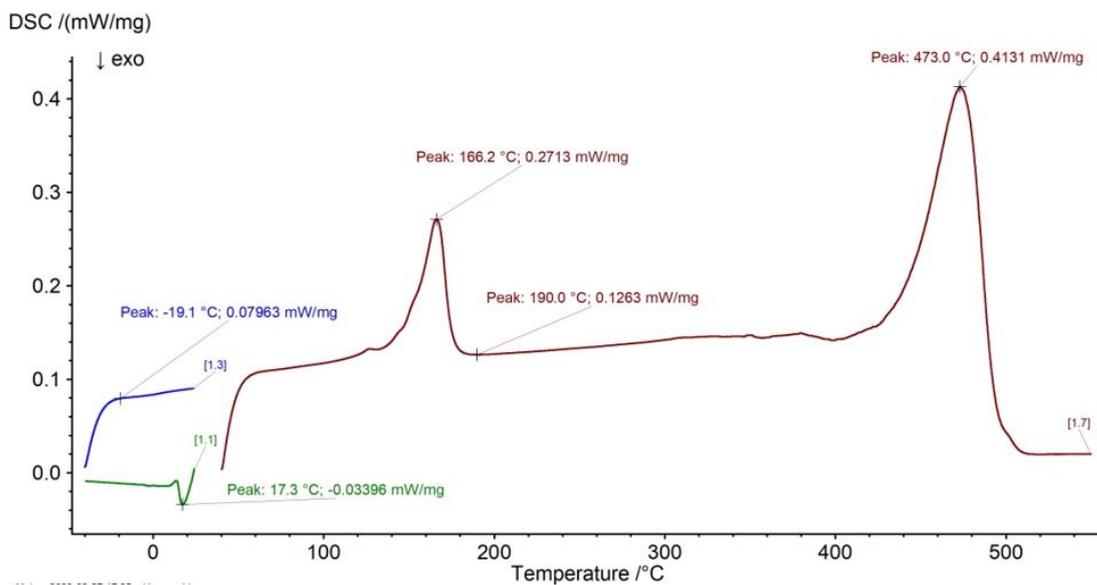
Fuente: (Estrella M., 2023).

Los análisis DSC de las repeticiones se adjuntan en el ANEXO A.

Para la muestra T30, el análisis térmico por la técnica de calorimetría diferencial de barrido permitió encontrar cambios entre las propiedades físicas y químicas de las muestras, lo cual se puede asociar a la cantidad de polipropileno y carbonato de calcio utilizado. En la Figura 18 se muestra el resultado del análisis DSC de la muestra formada por 70% de polipropileno reciclado y 30% de carbonato de calcio denominada T30.

En el segundo ensayo (T30), la curva DSC muestra pérdidas de masa lo cual está asociado a procesos endotérmicos. A la temperatura de 17.3 °C se presenta un proceso exotérmico. Luego del calentamiento se encuentra la temperatura de transición vítrea (Tg), esta se muestra a un valor de -19.1 °C. La temperatura de fusión se encuentra en un valor de 166.2 °C. Finalmente, se encontró la temperatura de descomposición (Td) sobre los 410 °C en la cual se rompen los enlaces covalentes que forman al polímero mixto (Merchán, 2016)

Figura 18 Análisis DSC muestra T30.



Fuente: (Estrella M., 2023).

En la Tabla 22 se presentan los resultados de las tres réplicas aplicadas al T30.

Tabla 22. Repeticiones del análisis T30.

T30	Tg (°C)	Tf (°C)	Td (°C)
-----	---------	---------	---------

R1	-19.0	161.8	474.5
R2	-19.1	166.2	473.0
R3	-20.9	166.2	477.0
Promedio	-19.67±	164.73±	474.83±

Fuente: (Estrella M., 2023).

La calorimetría diferencial de barrido permitió identificar los valores para la temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión y la temperatura de descomposición para luego ser comparados entre los tratamientos.

Según la información presentada por Hermida, (2011), cuando la longitud de la cadena polimérica se ve afectada, la movilidad, la resistencia, la tenacidad y la Tg del polímero se ven afectadas, es así que en el caso de los resultados reportados por los análisis térmicos específicamente en la Tg el valor aumenta de un tratamiento a otro, lo cual está ligado con el aumento del CaCO₃ en las muestras respectivas, esta particularidad se debe al efecto del calor en las fuerzas de atracción de Vander Walls y las fuerzas de entrecruzamiento de las cadenas en los polímeros mixtos, el aumento de este tipo de interacciones limita el movimiento de las cadenas individuales provocando restricciones en la deformación del material Caldera & Herrera, (2019); es decir, mientras más procesado sea un polímero la deformación se producirá bajo temperaturas más elevadas o a mayores tensiones.

La Tg se relaciona con el aumento de la temperatura. La Tg del polipropileno amorfo atáctico registrado en Protolabs (2023), tiene un valor negativo de -20 °C. Lamentablemente muchos estudios confunden los valores para Tg con los valores para la temperatura de fusión o la temperatura de cristalización, en la investigación se consigue con éxito verificar la Tg con valores negativos aproximados al valor antes mencionado, para ambos tratamientos, -20.03 y -19.67 °C respectivamente. Las Tg obtenidas permiten deducir que el agregar polvo de carbonato de calcio dentro de la matriz polimérica de polipropileno reciclado no presentan mayor variabilidad con el valor mencionado en la bibliografía. El comportamiento de la Tg y los valores negativos para estas muestras explican las diversas aplicaciones que se le puede dar a este polímero, tomando en cuenta que son estables a temperatura ambiente, pero en valores menores a -20 °C tienden a cristalizarse o reblandecerse algo característico de dicha propiedad (Pineda et al., 2006).

La temperatura de fusión de un polímero es aquel valor en el cual surge un cambio de estado fomentando el rompimiento de las cadenas y los enlaces C-C y C-H, el

polipropileno al ser un material combustible proveniente del petróleo tiende a combustionarse, la adición de polvo de carbonato de calcio a la matriz polimérica disminuye el valor referencial obtenido de CAMPUS, (2023) y registrado en la Tabla 2, este comportamiento puede relacionarse con el reprocesamiento de los materiales poliméricos, según Caicedo et al., (2017) en su estudio presenta que a medida que se reprocesa el PP va perdiendo gradualmente sus propiedades térmicas y mecánicas; es decir disminuye su temperatura de fusión, relacionando dicho comportamiento con los resultados de Tf se puede inferir que el reprocesamiento del material y la carga de CaCO_3 contribuyen a la disminución de la temperatura de fusión, la cual muestra una diferencia de 8 °C aproximadamente. Los valores obtenidos pueden diferir de otras investigaciones debido al uso de material, puede ser el polipropileno virgen de un proveedor específico o como en este caso el uso de materiales reciclados provenientes de distintos fabricantes. También se debe considerar que los materiales reciclados vienen de un procesamiento previo, para la obtención del producto final y el proceso secundario para la obtención del material polimérico mixto con la adicción del polvo de CaCO_3 . Es importante resaltar que, a pesar de los dos reprocesos del material mixto, el valor para la Tf no se distancia del valor registrado en bibliografía comparándolos con la tabla presentada anteriormente en la Tabla 1 y la Tabla 2 basadas en la investigación de Merchán, (2016) y la base de datos CAMPUS, (2023) respectivamente; este efecto puede estar relacionado con el aporte de cualidades de refuerzo del CaCO_3 , fomentando el objetivo del presente estudio.

El Análisis Termogravimétrico (TGA) muestra el proceso de descomposición de polímeros permitiendo registrar los cambios en la masa del material registrado como peso del material durante un aumento controlado de temperatura. Dentro del periodo de degradación térmica ocurren dos etapas: la primera con atmósfera inerte de nitrógeno y la segunda en una atmósfera reactiva con aire.

Con el objetivo de verificar el efecto que le otorga la carga de carbonato de calcio en la estabilidad térmica del polipropileno, se analizaron los dos tratamientos T15 y T30 utilizando este método.

La Figura 19 muestra una gran pérdida de masa en el rango de tiempos 16.5 a 22 min lo cual, comparándolos con las temperaturas de la tabla del Anexo B1 representa un rango de 369.33 a 482 °C, el valor aproximado de la descomposición es de 456 °C, este proceso se asocia a la ruptura de los enlaces carbono-carbono. Además, se registra un valor de

masa de 7.3648 mg lo cual representa un 41.53% de masa sobrante el cálculo de este porcentaje se muestra a continuación en la ecuación 1:

Ecuación 1 Cálculo del porcentaje de pérdida de masa para T15.

$$17.7331 \text{ mg} = 100\%$$

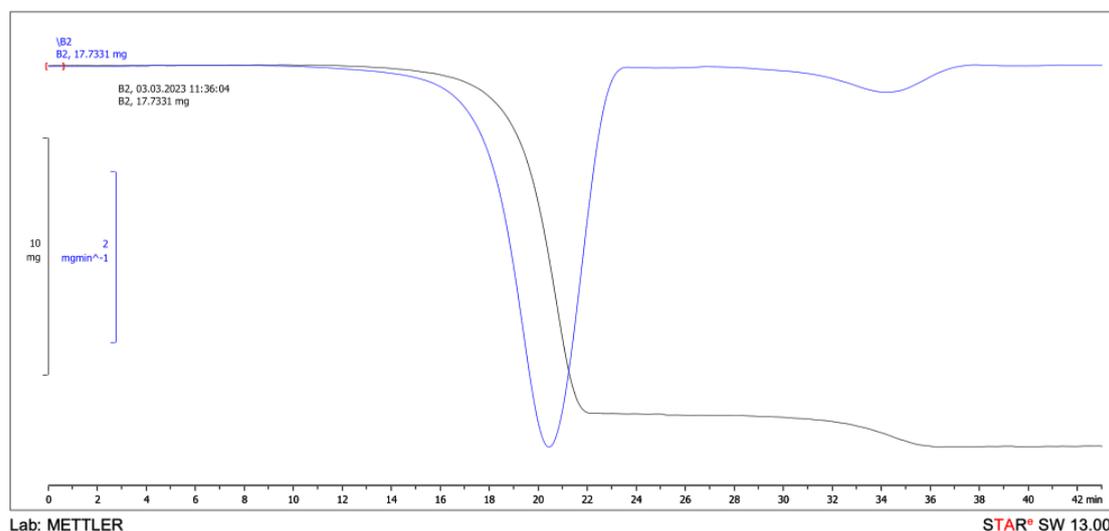
$$7.3648 \text{ mg} = \%msobrante$$

$$\%msobrante = \frac{100\% * 7.3648 \text{ mg}}{17.7331 \text{ mg}}$$

$$\%msobrante = 41.53\%$$

Existe un segundo proceso de pérdida de masa asociado a la formación de CO₂, el cual se presenta en el rango de tiempos desde 32 min hasta los 36 min, realizando la conversión se obtiene que los valores del intervalo en unidades de temperatura van desde los 681.33 °C hasta los 759.33 °C, el valor medio de esta temperatura es 724.67 °C. Se registra un valor de masa de 2.1944 mg lo cual representa un 12.37 % de masa sobrante. Finalmente se muestra un sobrante de 1.7203 mg lo que representa un 9.70 % de material sobrante.

Figura 19 *Análisis TGA muestra T15.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

Mientras tanto, para la muestra T30, los resultados del análisis termogravimétrico se evidencian en la Figura 20, donde se muestra uno de los análisis realizados para dicha muestra. El análisis se efectuó utilizando una masa inicial de 24.3847 mg durante un

tiempo de 43 minutos entre el rango de temperaturas 40 °C hasta los 900 °C utilizando gas Nitrógeno para una primera etapa y aire para la segunda etapa, como gases de arrastre.

Se evidencia gran pérdida de masa en el rango de tiempos 10 a 22 min lo cual corresponde a temperaturas de 239.33 y 482 °C, el valor aproximado de la temperatura de descomposición es de 450 °C, este proceso se asocia a la ruptura de los enlaces carbono-carbono. Además, se registra un valor de masa de 13.15 mg lo cual representa un 53.94 % de masa sobrante el cálculo de este porcentaje se muestra a continuación en la ecuación 2:

Ecuación 2. Cálculo del porcentaje de pérdida de masa para T30.

$$24.3847 \text{ mg} = 100\%$$

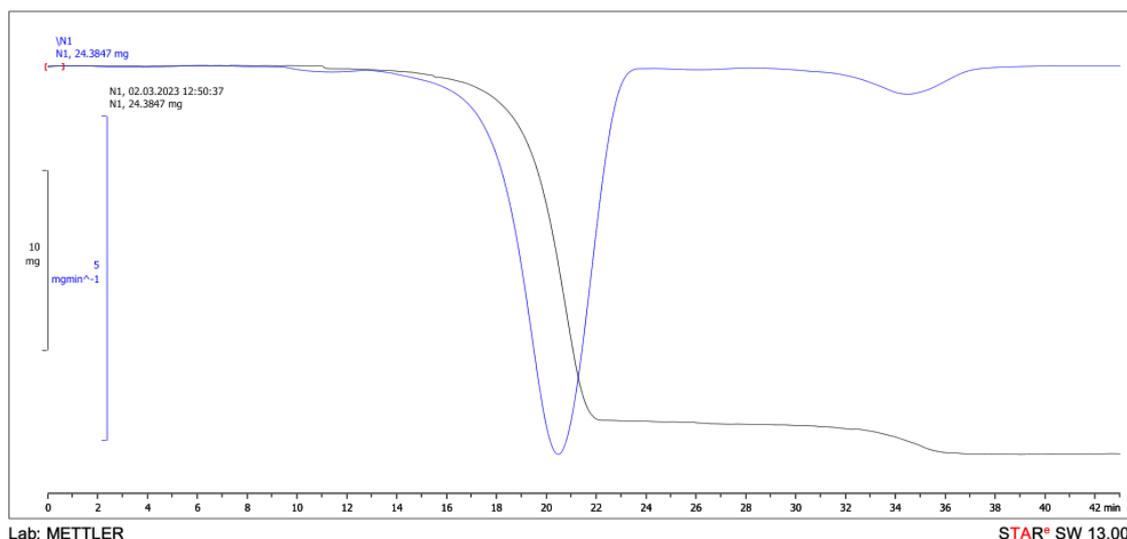
$$13.1531 \text{ mg} = \%msobrante$$

$$\%msobrante = \frac{100\% * 13.1531 \text{ mg}}{24.3847 \text{ mg}}$$

$$\%msobrante = 53.94\%$$

Existe un segundo proceso de pérdida de masa asociado a la formación de CO₂, el cual se presenta en el rango de tiempos desde 26 hasta los 36 min, realizando la conversión se obtiene que los valores del intervalo en unidades de temperatura van desde los 560 °C hasta los 759.33 °C, el valor medio de esta temperatura es 720 °C. Se registra un valor de masa de 3.6775 mg lo cual representa un 15.08 % de masa sobrante. Finalmente se muestra un sobrante de 2.8564 mg lo que representa un 11.71 % de material sobrante, datos registrados en la Tabla 23.

Figura 20 *Análisis TGA muestra T30.*



Fuente: (Estrella M., 2023).

Tabla 23 *Resultados para análisis TGA.*

Muestras	Primera pérdida		Segunda pérdida		Residuo inorgánico	
	Temperatura (°C)	%	Temperatura (°C)	%	Temperatura (°C)	%
T15	456	41.53	724.67	12.37	898	9.70%
T30	450	53.94	720	15.08	898	11.71

Fuente: (Estrella M., 2023).

4.5.1. Análisis estadístico de las propiedades térmicas.

La Tabla 23 muestra en resumen los valores obtenidos para la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura de fusión (T_f) y la temperatura de descomposición (T_d) de los dos tratamientos aplicados a los polímeros mixtos T15 y T30, comparados con valores de referencia provenientes de datos bibliográficos presentados en el apartado del marco teórico T0.

La T_d de un polímero es un valor al cual el material empieza a perder masa debido al calentamiento excesivo, los valores obtenidos en la investigación de Caicedo et al., (2017) muestran valores aproximados a los 380 °C, mientras que los resultados obtenidos por Mendoza, (2011) se observan valores cercanos a los 465 °C, no obstante, en el presente estudio se muestran valores para $T_d = 470$ °C. Dichos valores distan de los 287 °C

registrados en la bibliografía. Esto puede deberse a la adición del CaCO_3 , el cual incrementa el valor de la T_d al ser un compuesto inorgánico en mezcla dentro de la matriz polimérica del material mixto.

Luego de la discusión individual presentada en cada análisis podemos decir que añadir aditivos como el CaCO_3 proveniente de un desecho como las cáscaras de huevo de gallina a una matriz polimérica como el caso del PP reciclado presenta interesantes características en el comportamiento del material polimérico mixto.

Se realizó la determinación de la pérdida de masa en ambos tratamientos utilizando el análisis termogravimétrico dando como resultado la Tabla 8, con estos valores se puede evidenciar que a medida que aumenta la carga de polvo de CaCO_3 en la muestra de polímero mixto la pérdida de masa es menor y también su temperatura es menor, existen dos pérdidas registradas y en ambas se muestran comportamientos similares al descrito. Además, esa pérdida de masa menor puede relacionarse con la formación de impurezas como sulfatos de calcio o hidratos de calcio provenientes de la calcinación del polímero mixto. También, se presenta a la misma temperatura un sobrante de residuo inorgánico superior proveniente de la muestra que contiene mayor porcentaje de polvo de CaCO_3 , lo cual es lógico debido a que el CaCO_3 , los hidratos y sulfatos formados son compuestos de tipo inorgánico. Los valores de temperatura registrados son altos debido a que guardan relación con la temperatura de descomposición del CaCO_3 la cual se fluctúa entre 700 a 750 °C. Cabe recalcar que las muestras no contenían agua dentro de su composición por tal motivo no se pierde el 5% de la masa al inicio del análisis.

Tabla 24 Resultados de las temperaturas: T_g , T_f , T_d de las muestras T15 y T30.

Temperaturas	T_g (°C)	T_f (°C)	T_d (°C)
T0	-20	173	287
T15	-20.03	164.87	465.7
T30	-19.67	164.73	474.83

Fuente: propia.

Se realizó el mismo procedimiento estadístico antes mencionado para las propiedades mecánicas.

4.5.1.1. Temperatura de transición vítrea (T_g).

En la Tabla 25 se muestran los valores resultantes de los tratamientos aplicados a los polímeros mixtos, análisis de la temperatura de transición vítrea.

Tabla 25 Resultados de la temperatura de transición vítrea.

Temperatura de transición vítrea			
Réplicas	T0	T15	T30
1	-20	-19	-19
2	-20	-19.7	-19.1
3	-20	-21.4	-20.9
Suma($x_{i.}$)	-60	-60.1	-59
Promedio	-20.0	-20.0	-19.7
Des. Estándar	0	1.23	1.07

Nota: La tabla presenta los datos resultantes de las 3 réplicas en los tratamientos T0, T15 y T30. Fuente: propia.

En la Tabla 25 se muestran los resultados del análisis de la temperatura de transición vítrea ($^{\circ}\text{C}$), se observa que, el tratamiento T0 es el que tiene mayor puntaje -20 ± 0 , seguido por el T15 con un valor de -20 ± 1.23 y por último el T30 con un valor de -19.7 ± 1.07 .

4.5.1.1.1. Análisis de la varianza de la temperatura de transición vítrea.

La Tabla 26 presenta el análisis de la varianza para la temperatura de transición de las muestras T0, T15 y T30.

Tabla 26 Análisis de la Varianza la temperatura de transición vítrea.

Resumen Análisis de Varianza				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T0	3	-60	-20	0
T15	3	-60.1	-20.033	1.523
T30	3	-59	-19.667	1.143

Fuente: propia.

Tabla 27 ANOVA de la varianza temperatura de transición vítrea

ANOVA Tg						
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.24666667	2	0.12333333	0.13875	0.87315951	5.1432528
Dentro de los grupos	5.33333333	6	0.88888888			5
Total	5.58	8				

Fuente: propia.

En la Tabla 27, se observa que el F calculado es menor que el valor F crítico, por lo tanto, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula que dice “no es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado”.

4.5.1.1.2. Método de Tukey.

La Tabla 28 presenta el cálculo para la temperatura de transición vítrea utilizando el método de Tukey.

Tabla 28 Método de Tukey temperatura de transición vítrea.

Método de Tukey	
k	3
N-k	6
CM _E	0.88889
n _i	3
q _α (k,N-k)	4.34
T _{α=}	2.36

Fuente: propia.

Tabla 29 Diferencias Significativas y No Significativas temperatura de transición vítrea.

Diferencias Significativas y No Significativas		
Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
μ T0 - μ T15	0.03	Diferencia no significativa
μ T0 - μ T30	0.33	Diferencia no significativa
μ T15 - μ T30	0.37	Diferencia no significativa

Fuente: propia.

Se puede observar en la Tabla 29 que no se presentan diferencias significativas entre todos los tratamientos.

4.5.1.2. Temperatura de fusión (T_f)

La Tabla 30 muestra los valores resultantes de los tratamientos aplicados a los polímeros mixtos, análisis de la temperatura de temperatura de fusión.

Tabla 30 Resultados de la temperatura de fusión.

Temperatura de transición vítrea			
Réplicas	T0	T15	T30
1	173	164.4	161.8
2	173	164.4	166.2
3	173	165.8	166.2
Suma(x_i)	519	494.6	494.2
Promedio	173.0	164.9	164.7
Des. Estándar	0	0.81	2.54

Fuente: propia.

En la Tabla 30 se muestran los resultados del análisis de la temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$), se observa que, el tratamiento T0 es el que tiene mayor puntaje 173 ± 0 , seguido por el T15 con un valor de 164.9 ± 0.81 y por último el T30 con un valor de 164.7 ± 2.54

4.5.1.2.1. Análisis de la varianza de la temperatura de Fusión.

La Tabla 31 muestra el análisis de la varianza para la temperatura de fusión de las muestras: T0, T15 y T30.

Tabla 31 Análisis de la Varianza la temperatura de fusión.

Resumen Análisis de Varianza				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T0	3	519	173	0
T15	3	494.6	164.866667	0.65333333
T30	3	494.2	164.733333	6.45333333

Fuente: propia.

Tabla 32 ANOVA de la varianza temperatura de fusión.

ANOVA Tf						
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	134.506667	2	67.253333	28.390243	0.00087293	5.1432528
Dentro de los grupos	14.213333	6	2.3688888	9		5
Total	148.72	8				

Fuente: propia.

En la Tabla 32, se observa que el F calculado es mayor que el valor F crítico, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que dice “es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado”.

4.5.1.2.2. Método de Tukey.

La Tabla 33 muestra el cálculo de la temperatura de fusión utilizando el método Tukey.

Tabla 33 *Método de Tukey temperatura de fusión.*

Método de Tukey	
k	3
N-k	6
CM _E	2.36889
n _i	3
q _α (k,N-k)	4.34
T _{α=}	3.86

Fuente: propia.

Tabla 34 *Diferencias Significativas y No Significativas temperatura de fusión.*

Diferencias Significativas y No Significativas		
Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
μ T0 - μ T15	8.13	Diferencia significativa
μ T0 - μ T30	8.27	Diferencia significativa
μ T15 - μ T30	0.13	Diferencia no significativa

Fuente: propia.

Se puede observar en la Tabla 34 que se presentan diferencias significativas entre el tratamiento T0 y T15 y en los tratamientos T15 y T30, mientras que no se presentan diferencias significativas en los tratamientos T15 y T30.

4.5.1.3. Temperatura de descomposición (Td).

En la Tabla 35 se muestran los valores resultantes de los tratamientos aplicados a los polímeros mixtos, análisis de la temperatura de descomposición.

Tabla 35 Resultados de la temperatura de descomposición.

Temperatura de transición vítrea			
Réplicas	T0	T15	T30
1	287	471.6	474.5
2	287	477.9	473
3	287	447.6	477
Suma(x_i)			
Promedio	861	1397.1	1424.5
Des. Estándar	0	15.99	2.02

Fuente: propia.

En la Tabla 35 se muestran los resultados del análisis de la temperatura de descomposición en ($^{\circ}\text{C}$), se observa que, el tratamiento T30 es el que tiene mayor puntaje 1424.5 ± 2.02 , seguido por el T15 con un valor de 1397.1 ± 15.99 y por último el T0 con un valor de 861 ± 0 .

4.5.1.3.1. Análisis de la varianza de la temperatura de descomposición.

La Tabla 36 presenta el análisis de la varianza para la temperatura de descomposición de las muestras: T0, T15 y T30.

Tabla 36 Análisis de la Varianza la temperatura de descomposición.

Resumen Análisis de Varianza				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T0	3	861	287	0
T15	3	1397.1	465.7	255.63
T30	3	1424.5	474.833333	4.08333333

Fuente: propia.

Tabla 37 ANOVA de la varianza temperatura de descomposición

ANOVA Td						
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	67298.4689	2	33649.2344	388.688952	4.493E-07	5.14325285
Dentro de los grupos	519.426667	6	86.5711111			
Total	67817.8956	8				

Fuente: propia.

En la Tabla 37, se observa que el F calculado es mayor que el valor F crítico, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que dice “es posible obtener un polímero mixto con características similares a las del polipropileno virgen a partir de una mezcla de carbonato de calcio provenientes de la cáscara de huevo de gallina y polipropileno reciclado”.

4.5.1.3.2. Método de Tukey.

En la Tabla 38 se muestra el cálculo de la temperatura de descomposición utilizando el método de Tukey.

Tabla 38 Método de Tukey temperatura de descomposición.

Método de Tukey	
k	3
N-k	6
CM _E	86.57111
n _i	3
q _α (k, N-k)	4.34
T _{α=}	23.31

Fuente: propia.

Tabla 39 Diferencias Significativas y No Significativas temperatura de descomposición.

Diferencias Significativas y No Significativas		
Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
$\mu T0 - \mu T15$	178.70	Diferencia significativa
$\mu T0 - \mu T30$	187.83	Diferencia significativa
$\mu T15 - \mu T30$	9.13	Diferencia significativa

Fuente: propia.

Se puede observar en la Tabla 39 que se presentan diferencias significativas entre todos los tratamientos.

4.6. Comparación de resultados para las propiedades mecánicas y térmicas

Luego de realizar el análisis de las propiedades mecánicas y térmicas de cada polímero mixto obtenido se presenta en la Tabla 40 la comparación de los resultados.

Tabla 40 *Tabla comparativa de propiedades mecánicas y térmicas.*

Niveles de estudio	Análisis	Propiedades mecánicas			Propiedades térmicas		
		Módulo elástico [MPa]	Elongación a la rotura [%]	Resistencia a la tracción [MPa]	T. de transición vítrea (Tg)	T. de fusión (Tf)	T. de descomposición (Td)
T0		1746	7	38	-20	173	287
T15	Promedio	2662.9	1,3	32,94	-20.03	164.87	465.7
T30		3029.8	1,46	42.94	-19.67	164.73	474.83
Diferencias poblacionales		Diferencias Significativas y No Significativas					
μ T0- μ T15	Decisión	D.S.	D.S.	D.S.	D.N.S	D.S.	D.S.
μ T0- μ T30		D.S.	D.S.	D.S.	D.N.S	D.S.	D.S.
μ T15- μ T30		D.S.	D.S.	D.S.	D.N.S	D.N.S.	D.S.

Fuente: propia.

La Tabla 40 presenta un resumen de los valores obtenidos por los análisis mecánicos y térmicos aplicados a las dos muestras de polímero mixto, obtenidos de la mezcla de PP reciclado y el polvo de carbonato de calcio proveniente de la cáscara de gallina, y la comparación con valores registrados en la base de datos para productos plásticos CAMPUS, (2023).

La resistencia a la tracción muestra mayor valor en el segundo tratamiento debido a que al agregar un aditivo como el CaCO_3 , un material particulado sólido con propiedades rígidas, al estar dispersado dentro de la matriz polimérica del PP, genera una mayor resistencia al impacto y también está ligado al módulo elástico con un aumento gradual. Mientras tanto, el valor de elongación a la rotura no presenta un cambio considerable debido a que su medición se da en porcentaje, esto implica que el aditivo no afecta de forma exponencial a la elongación. Esta información se corrobora con la investigación bibliográfica presentada por Hermida, (2011) en donde se utiliza un material similar basado en polipropileno en y se resalta que el valor de la elongación nos permite determinar que los materiales obtenidos son de tipo frágil.

Analizando los resultados, se puede indicar que es factible realizar una adición de CaCO_3 dentro de una matriz del PPr siempre y cuando se realice una correcta dispersión del aditivo en la mezcla evidencia que compagina con lo observado por Rumiguano, (2011) en el cual se evalúan productos plásticos de PP con CaCO_3 proveniente de canteras de piedra. Es importante recalcar que la aglomeración de partículas puede generar errores en los análisis.

Producto de la investigación a temperatura ambiente, es importante recalcar que las propiedades mecánicas están ligadas con las temperaturas de tratamiento, por tal motivo se puede inferir que el procesamiento de materiales poliméricos mixtos con diferentes aditivos y distintas temperaturas provoca cambios importantes en las propiedades mecánicas y térmicas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Producto del trabajo realizado dentro de la presente investigación se puede concluir que:

El polvo proveniente de las cáscaras de huevo de gallina es CaCO_3 , el cual se obtuvo a través de un proceso sistemático de lavado, secado, molido y tamizado, dicho polvo, se utilizó como refuerzo para el material plástico mixto obtenido, además de darle un segundo uso a este material de desecho que todos poseemos en casa.

Las sustancias de desecho como el CaCO_3 proveniente de las cáscaras de huevo y el polipropileno reciclado proveniente de productos plásticos utilizados y desechados a diario en nuestros hogares, fueron los precursores para la obtención del material mixto en dos proporciones distintas, dicho material polimérico mixto muestra aspecto homogéneo, coloración gris, gran firmeza, espesor uniforme, también muestra flexibilidad media y cierta ductilidad, todo esto gracias a la buena dispersión de las partículas del polvo de CaCO_3 dentro de la matriz polimérica.

Los análisis mecánicos de las muestras T15 y T30 evidencian resultados interesantes con respecto a los valores registrados en bases de datos bibliográficos y en investigaciones similares. Con relación al módulo elástico los valores para el polímero mixto aumentaron al igual que para la resistencia a la tracción, al contrario de la elongación a la rotura el cual presenta una disminución muy marcada, esto está directamente relacionado con la adicción del polvo de CaCO_3 dentro del material y también con el reprocesamiento del material, ya que el polipropileno va perdiendo sus cualidades mecánicas al ser reprocesado.

Se constató que las propiedades térmicas de los polímeros mixtos son similares a las propiedades registradas en la base de datos CAMPUS (2023), algo a resaltar dentro de la temperatura de transición vítrea (T_g) es que para el PP la (T_g) posee valor negativo y gracias al modelo metodológico utilizado para el análisis, el valor coincide de manera casi exacta en los datos bibliográficos; es decir la (T_g) es la misma para los materiales analizados.

Se verificó que la temperatura de fusión disminuye en comparación con la base de datos CAMPUS (2023), debido al reprocesamiento del PP, tomando en cuenta que al obtener el material polimérico mixto se considera como su segundo procesamiento. A su vez los

resultados obtenidos para la temperatura de descomposición del polímero aumentaron con respecto a la misma, esto puede deberse a que la carga utilizada para el material aumenta la resistencia de este a la combustión, lo cual se evidenció también en los porcentajes de los residuos inorgánicos dentro de los análisis termogravimétricos.

De acuerdo al análisis estadístico de las propiedades mecánicas y térmicas se pudo constatar que existen diferencias significativas respecto al polímero virgen, debido a factores como el reprocesamiento del material. Es importante recordar que los datos bibliográficos son valores puntuales, pero en la realidad estos pueden cambiar por el fabricante o el tipo de PP medido, presentándose en un amplio rango de valores, así que, tanto el material obtenido del tratamiento T15 y el tratamiento T30 cumple con los requerimientos para ser utilizado dentro de una amplia gama de aplicaciones para productos plásticos asemejándose a las características del polipropileno virgen.

Los resultados obtenidos en el estudio conllevan a cumplir con los objetivos planteados pero, además, muestran una alternativa al uso de productos de materiales nuevos provenientes del petróleo; es decir, el utilizar materiales de desecho para obtener materiales mixtos con propiedades similares a los productos nuevos, abre un abanico de posibilidades en el campo de los plásticos y a la vez contribuye con la disminución de los desechos sólidos para mitigar el cambio climático, que como se ha expuesto dentro del presente estudio, día a día siguen acumulándose toneladas y toneladas de residuos plásticos de un solo uso. Probablemente, la solución para terminar de raíz con la contaminación sea reutilizar todos los materiales poliméricos, fomentando la investigación con respecto a la creación de materiales híbridos/mixtos con distintos aditivos que permitan recuperar sus características originales y darles una segunda oportunidad.

Finalmente, se puede aseverar que la obtención de un polímero mixto partiendo de sustancias de desecho es factible por sus aceptables propiedades mecánicas y térmicas, también es aplicable como una alternativa económica al uso de polipropileno virgen debido a su costo y además contribuye a la disminución de la contaminación ambiental puesto que utiliza materiales plásticos de un solo uso.

5.2. Recomendaciones

Realizar un estudio comparativo de materiales híbridos/mixtos a distintas temperaturas y partiendo de diferentes aditivos obtenidos de sustancias de desecho, para la verificación de propiedades mecánicas y térmicas, puesto que se pueden presentar casos donde las propiedades sean similares o mejores a las de los polímeros vírgenes.

Partiendo de la presente investigación se recomienda realizar una investigación ampliada sobre el análisis cinético utilizando los datos del TGA para ambas muestras de material polimérico mixto, debido a que se presentan cambios interesantes en la pérdida de masa y los rangos de temperaturas para dichas pérdidas, las cuales no se abordaron a profundidad por no ser parte de los objetivos del estudio.

Finalmente, se recomienda realizar un estudio económico y de factibilidad para la producción de materiales utilizando este polímero mixto como alternativa al uso de materiales plásticos de un solo uso, además de un estudio de degradabilidad para verificar si la adición de CaCO_3 influye en el tiempo de degradación del material.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez D. (2021, September 30). *Polímeros*. Enciclopedia Humanidades. <https://humanidades.com/polimeros/#ixzz7xCVfg4bd>
- Antúnez Sánchez, A., & Guanoquiza Tello, L. L. (2018). La contaminación ambiental en los acuíferos de Ecuador. *Revista Visión Contable*, 19, 64–101. <https://doi.org/10.24142/rvc.n19a4>
- Arroyo, Y., Dirigido, V., & Xavier Martínez De Osés, F. (n.d.). *Análisis y estudio de las islas de basura oceánicas Trabajo Final de Grado*.
- Ashby, M. F., Boston, A., London, H., Oxford, Y., San, P., San, D., Singapore, F., & Tokyo, S. (n.d.). *Materials Selection in Mechanical Design*. <http://books.elsevier.com>
- Barros, M. C., Bello, P. M., Bao, M., & Torrado, J. J. (2009). From waste to commodity: transforming shells into high purity calcium carbonate. *Journal of Cleaner Production*, 17(3), 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.08.013>
- Bashir, A. S. M., Manusamy, Y., Chew, T. L., Ismail, H., & Ramasamy, S. (2017a). Mechanical, thermal, and morphological properties of (eggshell powder)-filled natural rubber latex foam. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 23(1), 3–12. <https://doi.org/10.1002/vnl.21458>
- Bashir, A. S. M., Manusamy, Y., Chew, T. L., Ismail, H., & Ramasamy, S. (2017b). Mechanical, thermal, and morphological properties of (eggshell powder)-filled natural rubber latex foam. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 23(1), 3–12. <https://doi.org/10.1002/vnl.21458>
- Beltran M. Mancilla A. (2020). *TEMA 2. TIPOS DE PLASTICOS, ADITIVACIÓN Y MEZCLADO*.
- Bollaín Pastor, C., & Vicente Agulló, D. (2019). Presencia de Microplásticos en Aguas y su Potencial Impacto en la Salud Pública. *Revista Española de Salud Pública*, 93, 1–10.
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (3th ed., Vol. 1).
- Buteler, M., En, D., & Ambientales, C. (n.d.). *EL PROBLEMA DEL PLÁSTICO ¿Qué es la contaminación por plástico y por Qué nos afecta a todos?*
- Caicedo, C., Crespo, L., DeLa Cruz, H., & Álvarez, N. (2017). *Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento Thermo-mechanical properties of Polypropylene: Effects during reprocessing*.
- Caicedo-Cano, C., Crespo-Delgado, L. M., de la Cruz-Rodríguez, H., & Álvarez-Jaramillo, N. Á. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos

- durante el reprocesamiento. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 345–352. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.022>
- Caldera Villalobos, M., & Herrera González, A. M. (2019). Polímeros adhesivos y formación de uniones a través de reacciones de polimerización y fuerzas intermoleculares. *Educación química*, 30(2), 2-13.
- Callister, W. D. (2007). *Materials science and engineering : an introduction*. John Wiley & Sons.
- Carliño, F. J., Franklin, ;, Segura, O., & Esidio, J. (n.d.). *76 Manuel*.
- Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2010). APROVECHAMIENTO DE POLIPROPILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD RECICLADOS, REFORZADOS CON FIBRA VEGETAL, TETERA (Stromanthe Stromathoides). In *Rev. Iberoam. Polím* (Vol. 11, Issue 7).
- Cuéllar Jerson. (2020, December 10). *Huevo de gallina: el alimento más completo*. Veterinaria Digital.
- De, C., Mecánica, I., Mecánicas, P., Partes, D. E., & De, E. (n.d.). *UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MATRÍZ EPÓXICA REFORZADA CON TEJIDO MIXTO ELABORADO CON FIBRAS DE CARBONO Y KEVLAR Y SU INCIDENCIA EN LAS*.
- De, P., De Polipropileno, N., Montmorillonita, Y., Mezclado, P., Julie, R., Merchán, P., Bahía, S., & Argentina, B. (2016). *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR. Ecuador normativa para plásticos*. (n.d.).
- Feng, Y., Ashok, B., Madhukar, K., Zhang, J., Zhang, J., Reddy, K. O., & Rajulu, A. V. (2014). Preparation and Characterization of Polypropylene Carbonate Bio-Filler (Eggshell Powder) Composite Films. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 19(7), 637–647. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2014.953747>
- Gómez, S. & C. E. (2022). Composite materials reinforced with fique fibers – a review Materiales compuestos reforzados con fibras de fique-revisión. *Revista U I S*, 21(1), 163–178.
- González, J., Lbano, C. A., Candal, M. V., Ichazo, M., Hernandez, M., Mayz, M. A., & Martínez, Á. (2006). Caracterización de compuestos a base de poliolefinas y conchas de mar. *Revista de La Facultad de Ingeniería*, 21(3), 89–104.
- Guapacha, J., Failla, M., Quinzani, L., & Valles, E. (2016). *Desarrollo sostenible de la industria del polipropileno: Propiedades controladas a medida y optimización del consumo energético y de la degradación*.

- Hermida, É. (2011). Capítulo 9: Polímeros. *Colección Materiales y Materias Primas.*, 2, 70. http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf
- Hernández, J., Eleazar, Á., Rodríguez, S., Blanco, A., Cerecedo, P. E., Ventura, S., & Lugo, R. (2014). *Carbonato de calcio en México Características geológicas, mineralógicas y aplicaciones*. <http://dx.doi.org/oms.239>
- Jara, M. & M. J. (2002). COMPUESTOS MIXTOS A BASE DE PLASTICOS Y MADERA. *Theoria [En Linea]*.
- Jara, M. S., Justo, Y., & Muñoz, L. (n.d.). *COMPUESTOS MIXTOS A BASE DE PLASTICOS Y MADERA WOOD-POLYMER COMPOSITES*.
- Mamede José, N., & Antônio Sanchez de Almeida Prado, L. (2005). MATERIAIS HÍBRIDOS ORGÂNICO-INORGÂNICOS: PREPARAÇÃO E ALGUMAS APLICAÇÕES. In *Quim. Nova* (Vol. 28, Issue 2).
- Mercadé, A. (2010, September 22). *El huevo: formación, estructura y composición*. Biología, Ciencia.
- Monzó Matías. (2015). *DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE MATERIALES TESIS DOCTORAL*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/58776/Monz%C3%B3%20-%20Investigaci%C3%B3n%20de%20la%20influencia%20del%20tipo%20de%20gas%20utilizado%20en%20el%20plasma%20atmosf%C3%A9rico%2C%20en%20la%20...pdf?sequence=1>
- Moon, D. (2022). Cómo definir los productos, materiales y polímeros de plástico: . In *GAIA: Global Alliance for Incinerator Alternatives*.
- Pereira, P. H. F., De Freitas Rosa, M., Cioffi, M. O. H., De Carvalho Benini, K. C. C., Milanese, A. C., Voorwald, H. J. C., & Mulinari, D. R. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites: A review. *Polimeros*, 25(1), 9–22.
<https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>
- Pineda, P., Prieto, G. N., Gómez, H., Rosales-Rivera, A., & Quintero, C. (2006). ESTUDIO DE LA TRANSICIÓN VÍTREA EN EL POLIESTIRENO POR DSC Y MDSC. *Revista Colombiana de Física*, 38(3).
- Portilla-Jiménez, J. G. (2022). Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador Orientado al Sector de los Plásticos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 38–47. <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3364>
- Protolabs. (2023). Temperatura de transición vítrea de los polímeros. *Protolabs.Com.Ec*.

- Radaker, M. (2022). *APAGADO DE CAL 101*.
https://es.sttsystems.com/_onelink_/sttsystems/projects/sttsystems/enus2eses/pdf/Lime_Slaking_101_Whitepaper_1-27-22-es-ES.pdf
- Ramirez, Y. (n.d.). *Extracción de CaCO₃ de cascara de huevo*.
- Rodríguez, S. (2020). Analysis of environmental contaminants with molecularly imprinted polymers. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 36(1), 197–207. <https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.32101>
- Rodriguez-Navarro, A., Kalin, O., Nys, Y., & Garcia-Ruiz, J. M. (2002). Influence of the microstructure on the shell strength of eggs laid by hens of different ages. *British Poultry Science*, 43(3), 395–403.
<https://doi.org/10.1080/00071660120103675>
- Rumiguano, L. (2011). *Evaluación de compuestos de polipropileno y Carbonato de Calcio para aplicaciones industriales*.
- Schwarz, O. (2002). *Ciencia de los plásticos : composición, propiedades, procesamiento, aplicaciones de los termoplásticos, duroplásticos y elastómeros* (EBELING Friedrich, Ed.; 1a ed., Vol. 1).
- Shuhadah, S., & Ghani, S. A. (n.d.). *LDPE-Isophthalic Acid-Modified Egg Shell Powder Composites (LDPE/ESPI)*.
<https://www.researchgate.net/publication/43656177>
- Taniike Toshiaki and Terano, M. (2013). The Use of Donors to Increase the Isotacticity of Polypropylene. In W. Kaminsky (Ed.), *Polyolefins: 50 years after Ziegler and Natta I: Polyethylene and Polypropylene* (pp. 81–97). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/12_2013_224
- Tiimob, B. J., Mwinyelle, G., Abdela, W., Samuel, T., Jeelani, S., & Rangari, V. K. (2017). Nanoengineered Eggshell-Silver Tailored Copolyester Polymer Blend Film with Antimicrobial Properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(9), 1967–1976. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00133>
- UNIVERSIDAD EAN ESTUDIO PARA EL DESARROLLO DE UN BIOMATERIAL DE CÁSCARA DE HUEVO AUTORES NATHALIA BELTRÁN RAMÍREZ, INGENIERÍA QUÍMICA. YENNY GONZÁLEZ FINO, INGENIERÍA QUÍMICA LADY JOHANNA HERNÁNDEZ GÓMEZ, INGENIERÍA QUÍMICA. PROFESORA LILIANA MARGARITA MEZA BUELVAS FACULTAD DE INGENIERÍA BOGOTÁ, 2021. (n.d.).**
- Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S., & Merino, F. (2011). Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 133–136.
<https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.62>

- Wasiak, A., & Woźniak, A. (1999). Effects of cooling rate on crystallinity of i-polypropylene and polyethylene terephthalate crystallized in nonisothermal conditions. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, , 2821–2827.
- Yew, M. C., Ramli Sulong, N. H., Yew, M. K., Amalina, M. A., & Johan, M. R. (2013). The formulation and study of the thermal stability and mechanical properties of an acrylic coating using chicken eggshell as a novel bio-filler. *Progress in Organic Coatings*, 76(11), 1549–1555. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.06.011>

ANEXOS

Anexo A. Repeticiones del análisis DSC para T15 y T30.

Figura A 1 Análisis DSC para T15 repetición 1.

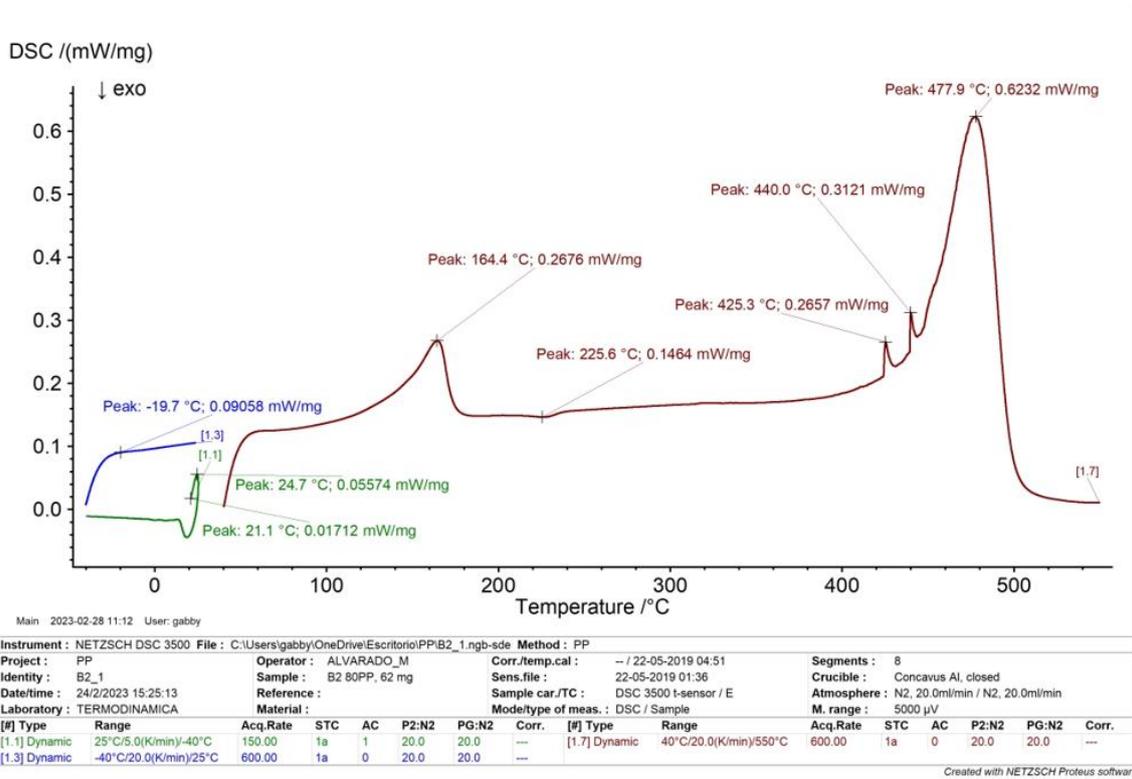


Figura A 2 Análisis DSC para T15 repetición 2.

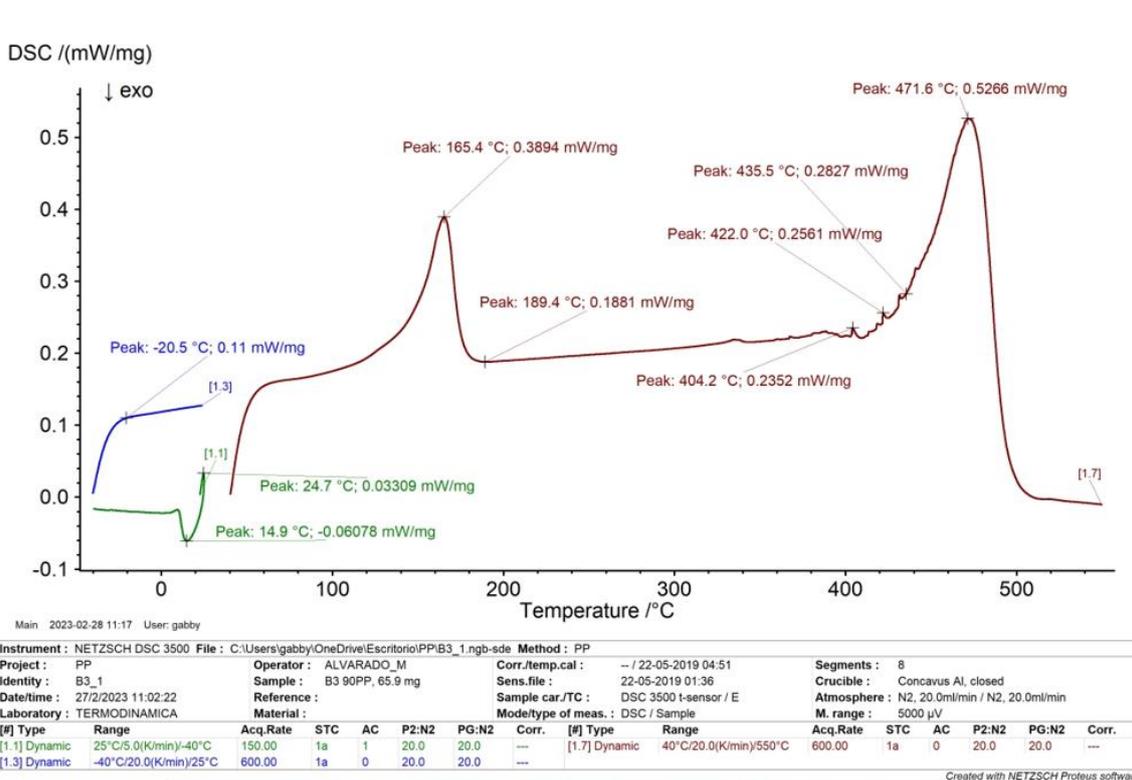


Figura A 3 Análisis DSC para T15 repetición 3.

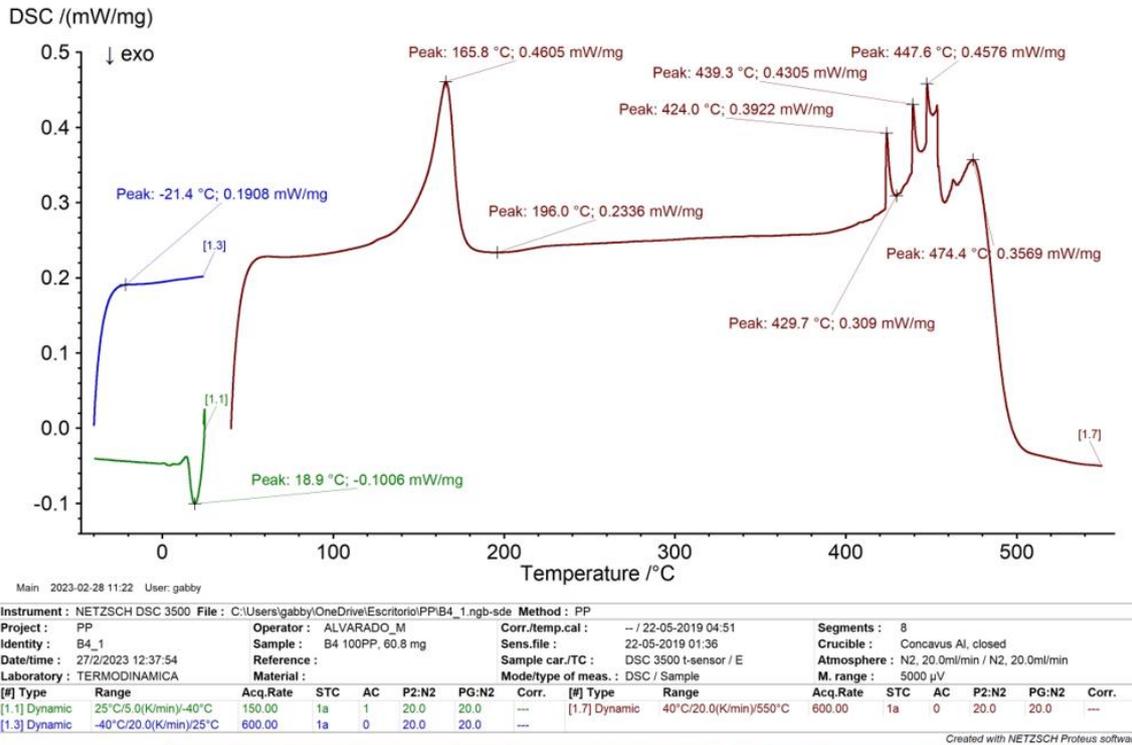


Figura A 4 Análisis DSC para T30 repetición 1.

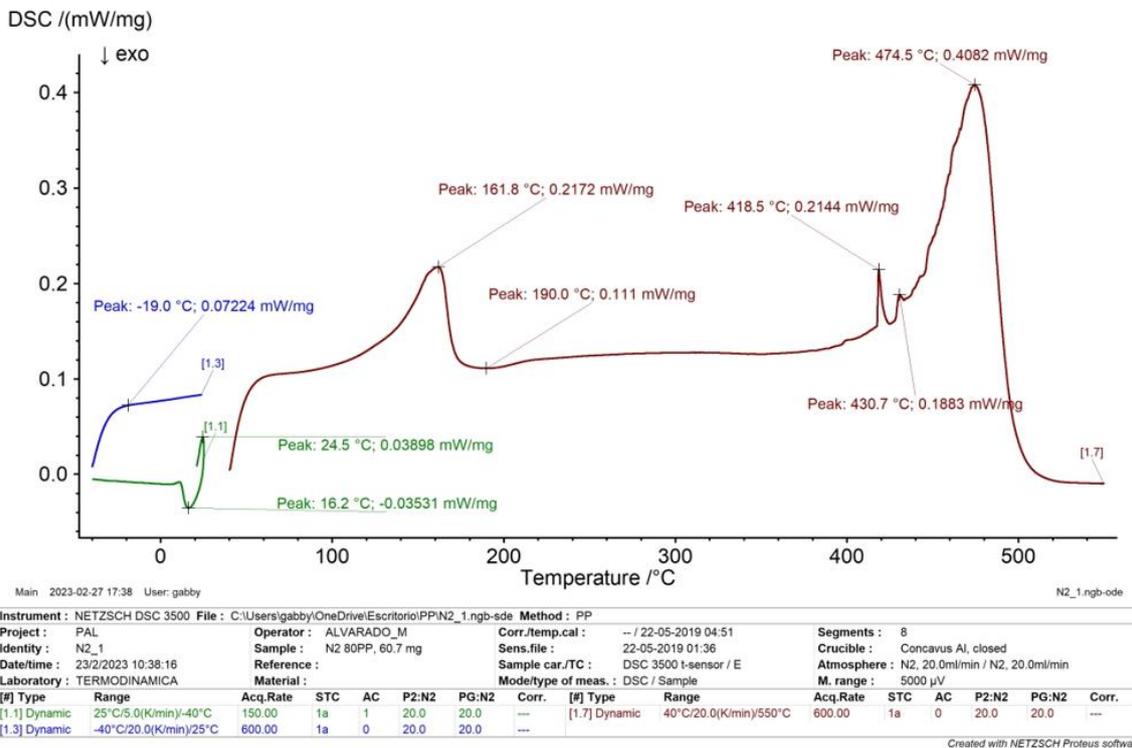


Figura A 5 Análisis DSC para 30 repetición 2.

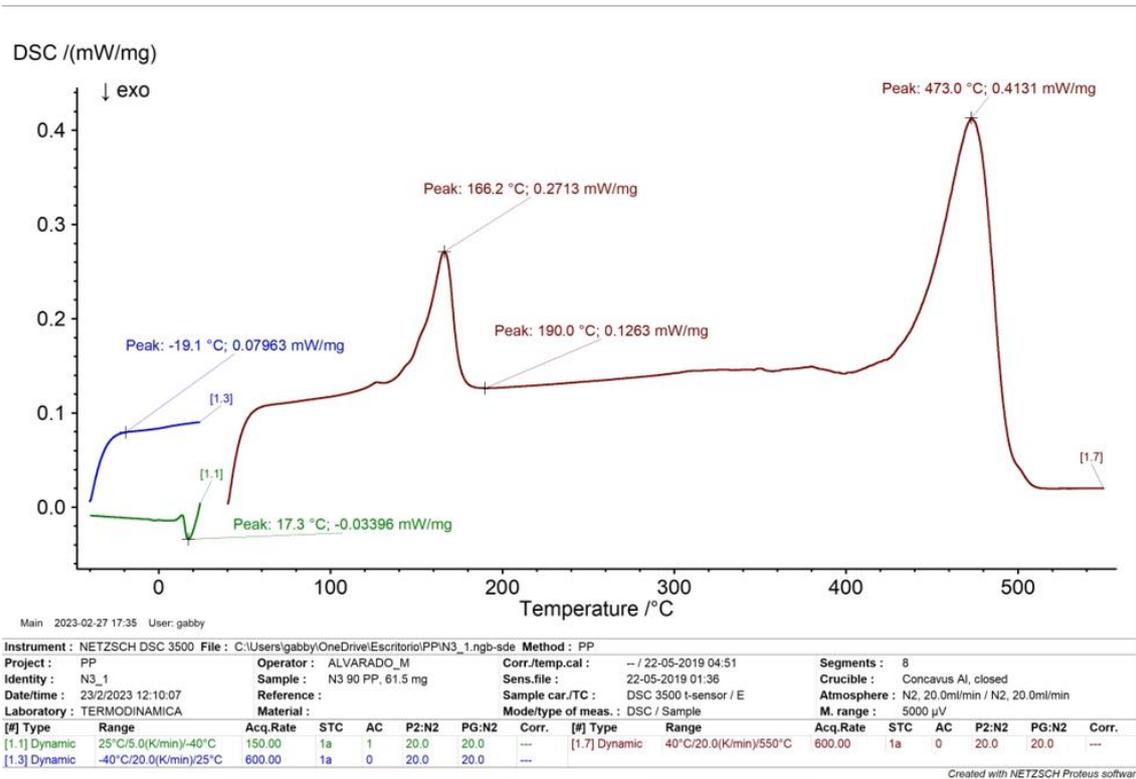
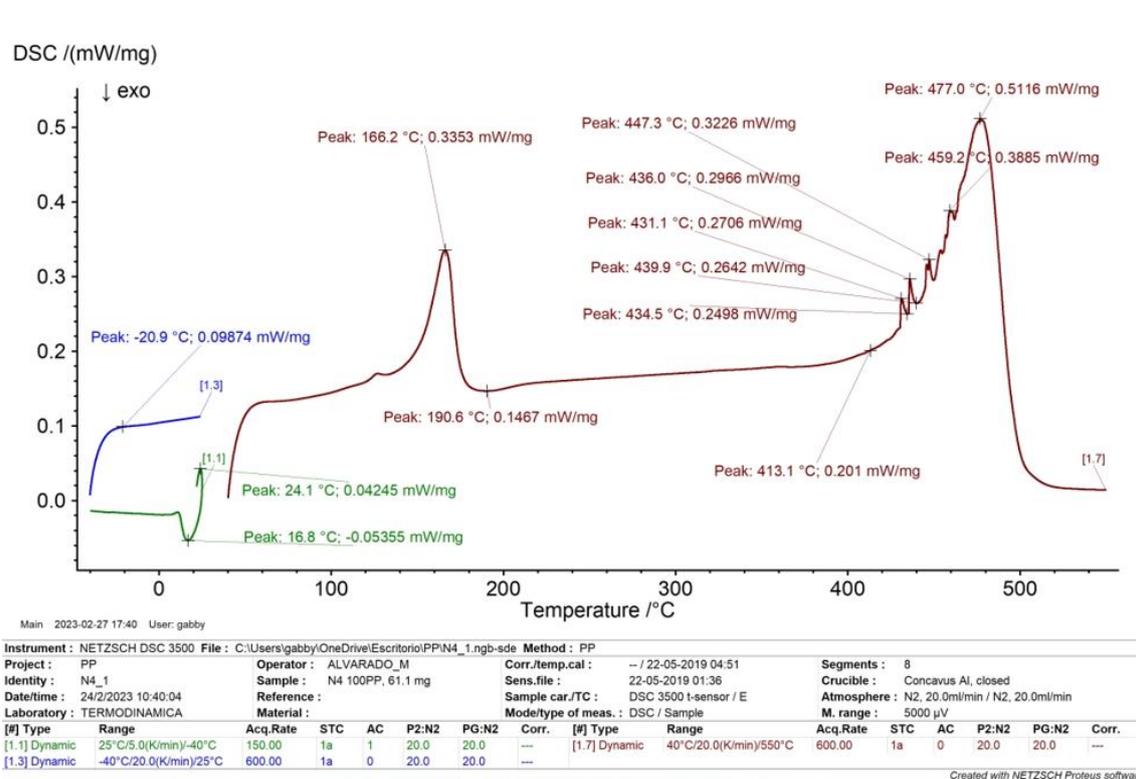


Figura A 6. Análisis DSC para T30 repetición 3.



Anexo B. Análisis TGA para T15 y T30.

Figura B 1 Análisis TGA para T15.

Curve Name:
82, 03.03.2023 11:36:04
Performed 03.03.2023 11:36:04

Curve Values:

Index	t [s]	Ts [°C]	Tr [°C]	Value [mg]
0	0	40	40	17.7331
26	26	48.6667	48.6667	17.747
52	52	57.3333	57.3333	17.7506
78	78	66	66	17.7521
104	104	74.6667	74.6667	17.7364
130	130	83.3333	83.3333	17.7357
156	156	92	92	17.736
182	182	100.667	100.667	17.727
208	208	109.333	109.333	17.735
234	234	118	118	17.7281
260	260	126.667	126.667	17.738
286	286	135.333	135.333	17.7342
312	312	144	144	17.7315
338	338	152.667	152.667	17.743
364	364	161.333	161.333	17.738
390	390	170	170	17.7488
416	416	178.667	178.667	17.7454
442	442	187.333	187.333	17.753
468	468	196	196	17.7546
494	494	204.667	204.667	17.7515
520	520	213.333	213.333	17.762
546	546	222	222	17.7554
572	572	230.667	230.667	17.7659
598	598	239.333	239.333	17.7596
624	624	248	248	17.7544
650	650	256.667	256.667	17.7575
676	676	265.333	265.333	17.7401
702	702	274	274	17.7372
728	728	282.667	282.667	17.7154
754	754	291.333	291.333	17.7079
780	780	300	300	17.6814
806	806	308.667	308.667	17.6549
832	832	317.333	317.333	17.6274
858	858	326	326	17.5848
884	884	334.667	334.667	17.5468
910	910	343.333	343.333	17.4824
936	936	352	352	17.4231
962	962	360.667	360.667	17.3376
988	988	369.333	369.333	17.232
1014	1014	378	378	17.0878
1040	1040	386.667	386.667	16.8835
1066	1066	395.333	395.333	16.6126
1092	1092	404	404	16.2201
1118	1118	412.667	412.667	15.6903
1144	1144	421.333	421.333	14.9248
1170	1170	430	430	13.8303
1196	1196	438.667	438.667	12.2198
1222	1222	447.333	447.333	10.0092
1248	1248	456	456	7.3648
1274	1274	464.667	464.667	4.88875
1300	1300	473.333	473.333	3.45965
1326	1326	482	482	3.10395
1352	1352	490.667	490.667	3.0899
1378	1378	499.333	499.333	3.085
1404	1404	508	508	3.07385
1430	1430	516.667	516.667	3.0731
1456	1456	525.333	525.333	3.06475
1482	1482	534	534	3.06715
1508	1508	542.667	542.667	3.04098
1534	1534	551.333	551.333	3.0238
1560	1560	560	560	3.01478
1586	1586	568.667	568.667	3.01467
1612	1612	577.333	577.333	3.01024
1638	1638	586	586	3.00475
1664	1664	594.667	594.667	3.00191
1690	1690	603.333	603.333	2.99957
1716	1716	612	612	2.9851
1742	1742	620.667	620.667	2.965
1768	1768	629.333	629.333	2.95225
1794	1794	638	638	2.93215
1820	1820	646.667	646.667	2.89802
1846	1846	655.333	655.333	2.87612
1872	1872	664	664	2.8355
1898	1898	672.667	672.667	2.797
1924	1924	681.333	681.333	2.73655
1950	1950	690	690	2.66939
1976	1976	698.667	698.667	2.5752
2002	2002	707.333	707.333	2.4725
2028	2028	716	716	2.33545
2054	2054	724.667	724.667	2.1944
2080	2080	733.333	733.333	2.02678
2106	2106	742	742	1.88675
2132	2132	750.667	750.667	1.7693
2158	2158	759.333	759.333	1.7161
2184	2184	768	768	1.673
2210	2210	776.667	776.667	1.632
2236	2236	785.333	785.333	1.60145
2262	2262	794	794	1.632
2288	2288	802.667	802.667	1.60445
2314	2314	811.333	811.333	1.7019
2340	2340	820	820	1.71075
2366	2366	828.667	828.667	1.6993
2392	2392	837.333	837.333	1.682
2418	2418	846	846	1.681
2444	2444	854.667	854.667	1.705
2470	2470	863.333	863.333	1.703
2496	2496	872	872	1.706
2522	2522	880.667	880.667	1.7057
2548	2548	889.333	889.333	1.719
2574	2574	898	898	1.7203

Figura B 2 *Análisis TGA para T30.*

02.03.2023 12:50:37
 *formed 02.03.2023 12:50:36
 ! Values:

Index	t [s]	Ts [°C]	Tr [°C]	Value [mg]
0	0	40	40	24.3847
26	26	48.6667	48.6667	24.431
52	52	57.3333	57.3333	24.4484
78	78	66	66	24.4548
104	104	74.6667	74.6667	24.4458
130	130	83.3333	83.3333	24.447
156	156	92	92	24.44
182	182	100.667	100.667	24.451
208	208	109.333	109.333	24.4334
234	234	118	118	24.419
260	260	126.667	126.667	24.4306
286	286	135.333	135.333	24.422
312	312	144	144	24.4266
338	338	152.667	152.667	24.439
364	364	161.333	161.333	24.435
390	390	170	170	24.4573
416	416	178.667	178.667	24.465
442	442	187.333	187.333	24.4693
468	468	196	196	24.464
494	494	204.667	204.667	24.4533
520	520	213.333	213.333	24.4619
546	546	222	222	24.457
572	572	230.667	230.667	24.4607
598	598	239.333	239.333	24.4573
624	624	248	248	24.4478
650	650	256.667	256.667	24.442
676	676	265.333	265.333	24.2885
702	702	274	274	24.2826
728	728	282.667	282.667	24.2772
754	754	291.333	291.333	24.2551
780	780	300	300	24.225
806	806	308.667	308.667	24.1981
832	832	317.333	317.333	24.1679
858	858	326	326	24.114
884	884	334.667	334.667	24.0602
910	910	343.333	343.333	23.9649
936	936	352	352	23.8105
962	962	360.667	360.667	23.732
988	988	369.333	369.333	23.5911
1014	1014	378	378	23.4128
1040	1040	386.667	386.667	23.1389
1066	1066	395.333	395.333	22.79
1092	1092	404	404	22.2865
1118	1118	412.667	412.667	21.6107
1144	1144	421.333	421.333	20.6244
1170	1170	430	430	19.1878
1196	1196	438.667	438.667	17.0853
1222	1222	447.333	447.333	14.224
1248	1248	456	456	10.7336
1274	1274	464.667	464.667	7.3543
1300	1300	473.333	473.333	5.33109
1326	1326	482	482	4.7405
1352	1352	490.667	490.667	4.71725
1378	1378	499.333	499.333	4.69361
1404	1404	508	508	4.68459
1430	1430	516.667	516.667	4.667
1456	1456	525.333	525.333	4.6487
1482	1482	534	534	4.632
1508	1508	542.667	542.667	4.6359
1534	1534	551.333	551.333	4.61075
1560	1560	560	560	4.58749
1586	1586	568.667	568.667	4.55793
1612	1612	577.333	577.333	4.5228
1638	1638	586	586	4.5066
1664	1664	594.667	594.667	4.51108
1690	1690	603.333	603.333	4.4955
1716	1716	612	612	4.4959
1742	1742	620.667	620.667	4.47445
1768	1768	629.333	629.333	4.468
1794	1794	638	638	4.4399
1820	1820	646.667	646.667	4.4243
1846	1846	655.333	655.333	4.40188
1872	1872	664	664	4.3523
1898	1898	672.667	672.667	4.30903
1924	1924	681.333	681.333	4.2448
1950	1950	690	690	4.23035
1976	1976	698.667	698.667	4.13184
2002	2002	707.333	707.333	4.00878
2028	2028	716	716	3.85795
2054	2054	724.667	724.667	3.67725
2080	2080	733.333	733.333	3.47025
2106	2106	742	742	3.23415
2132	2132	750.667	750.667	3.03283
2158	2158	759.333	759.333	2.9275
2184	2184	768	768	2.90026
2210	2210	776.667	776.667	2.85045
2236	2236	785.333	785.333	2.853
2262	2262	794	794	2.834
2288	2288	802.667	802.667	2.837
2314	2314	811.333	811.333	2.8268
2340	2340	820	820	2.824
2366	2366	828.667	828.667	2.832
2392	2392	837.333	837.333	2.829
2418	2418	846	846	2.839
2444	2444	854.667	854.667	2.8391
2470	2470	863.333	863.333	2.847
2496	2496	872	872	2.8488
2522	2522	880.667	880.667	2.84995
2548	2548	889.333	889.333	2.85905
2574	2574	898	898	2.8564

Anexo C. Tabla de cuartiles para la distribución de Tukey.

Figura C 1 Tabla de cuartiles de la distribución de Tukey.

$\alpha = 0.05$	n														
m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
2	6.08	8.33	9.80	10.88	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.40	14.76	15.09	15.39	15.67	
3	4.50	5.91	6.82	7.50	8.04	8.48	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.15	10.35	10.52	
4	3.93	5.04	5.76	6.29	6.71	7.05	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.66	
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72	
6	3.46	4.34	4.90	5.30	5.63	5.90	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.03	7.14	
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	6.30	6.43	6.55	6.66	6.76	
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	
9	3.20	3.95	4.41	4.76	5.02	5.24	5.43	5.59	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	
10	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.11	
11	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98	
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.39	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88	
13	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.55	5.64	5.71	
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65	
16	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	
17	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.54	
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	
19	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.31	5.39	5.46	
20	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	
21	2.94	3.56	3.94	4.21	4.42	4.60	4.74	4.87	4.98	5.08	5.17	5.25	5.33	5.40	
22	2.93	3.55	3.93	4.20	4.41	4.58	4.72	4.85	4.96	5.06	5.14	5.23	5.30	5.37	
23	2.93	3.54	3.91	4.18	4.39	4.56	4.70	4.83	4.94	5.03	5.12	5.20	5.27	5.34	
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	
25	2.91	3.52	3.89	4.15	4.36	4.53	4.67	4.79	4.90	4.99	5.08	5.16	5.23	5.30	
26	2.91	3.51	3.88	4.14	4.35	4.51	4.65	4.77	4.88	4.98	5.06	5.14	5.21	5.28	
27	2.90	3.51	3.87	4.13	4.33	4.50	4.64	4.76	4.86	4.96	5.04	5.12	5.19	5.26	
28	2.90	3.50	3.86	4.12	4.32	4.49	4.62	4.74	4.85	4.94	5.03	5.11	5.18	5.24	
29	2.89	3.49	3.85	4.11	4.31	4.47	4.61	4.73	4.84	4.93	5.01	5.09	5.16	5.23	
30	2.89	3.49	3.85	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.82	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	
31	2.88	3.48	3.84	4.09	4.29	4.45	4.59	4.71	4.81	4.90	4.99	5.06	5.13	5.20	
32	2.88	3.48	3.83	4.09	4.28	4.45	4.58	4.70	4.80	4.89	4.98	5.05	5.12	5.18	
33	2.88	3.47	3.83	4.08	4.28	4.44	4.57	4.69	4.79	4.88	4.97	5.04	5.11	5.17	
34	2.87	3.47	3.82	4.07	4.27	4.43	4.56	4.68	4.78	4.87	4.96	5.03	5.10	5.16	
35	2.87	3.46	3.81	4.07	4.26	4.42	4.56	4.67	4.77	4.86	4.95	5.02	5.09	5.15	
36	2.87	3.46	3.81	4.06	4.25	4.41	4.55	4.66	4.76	4.85	4.94	5.01	5.08	5.14	
37	2.87	3.45	3.80	4.05	4.25	4.41	4.54	4.66	4.76	4.85	4.93	5.00	5.07	5.13	
38	2.86	3.45	3.80	4.05	4.24	4.40	4.53	4.65	4.75	4.84	4.92	4.99	5.06	5.12	
39	2.86	3.45	3.79	4.04	4.24	4.39	4.53	4.64	4.74	4.83	4.91	4.98	5.05	5.11	
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.73	4.82	4.90	4.98	5.04	5.11	
41	2.86	3.44	3.79	4.03	4.23	4.38	4.51	4.63	4.73	4.82	4.90	4.97	5.04	5.10	
42	2.85	3.44	3.78	4.03	4.22	4.38	4.51	4.62	4.72	4.81	4.89	4.96	5.03	5.09	
43	2.85	3.43	3.78	4.03	4.22	4.37	4.50	4.62	4.72	4.80	4.88	4.96	5.02	5.08	
44	2.85	3.43	3.78	4.02	4.21	4.37	4.50	4.61	4.71	4.80	4.88	4.95	5.02	5.08	
45	2.85	3.43	3.77	4.02	4.21	4.36	4.49	4.61	4.70	4.79	4.87	4.94	5.01	5.07	
46	2.85	3.42	3.77	4.01	4.20	4.36	4.49	4.60	4.70	4.79	4.87	4.94	5.00	5.06	
47	2.85	3.42	3.77	4.01	4.20	4.36	4.48	4.60	4.69	4.78	4.86	4.93	5.00	5.06	
48	2.84	3.42	3.76	4.01	4.20	4.35	4.48	4.59	4.69	4.78	4.86	4.93	4.99	5.05	
49	2.84	3.42	3.76	4.00	4.19	4.35	4.48	4.59	4.69	4.77	4.85	4.92	4.99	5.05	
50	2.84	3.42	3.76	4.00	4.19	4.34	4.47	4.58	4.68	4.77	4.85	4.92	4.98	5.04	