

EVALUACIÓN DEL INCREMENTO DE POLIETILENTEREFTALATO AMORFO
OBTENIDO POR RECICLAJE MECÁNICO AL PROCESO DE INYECCIÓN Y
SOPLADO DE BOTELLAS NO RETORNABLES EN IBERPLAST S.A.S.

JEIMMY PAOLA DÍAZ CONTRERAS
PAULA ALEJANDRA PARRA LANDINEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

EVALUACIÓN DEL INCREMENTO DE POLIETILENTEREFTALATO AMORFO
OBTENIDO POR RECICLAJE MECÁNICO AL PROCESO DE INYECCIÓN Y
SOPLADO DE BOTELLAS NO RETORNABLES EN IBERPLAST S.A.S.

JEIMMY PAOLA DÍAZ CONTRERAS
PAULA ALEJANDRA PARRA LANDINEZ

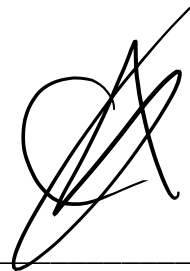
Proyecto integral de grado para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO

Asesor
Edgar Fernando Moreno Torres
Ing. Químico

Directora
Jenny Marcela Lizarazo Castellanos
Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

Nota de aceptación: 4.8



Ing. Juan Camilo Cely Garzón
Jurado 1

David Triviño R.

Ing. David Triviño Rodríguez
Jurado 2

Bogotá D.C., agosto de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dr. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dr. ALEJANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de Facultad Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. IVAN RAMIREZ MARÍN

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a las autoras.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos a:

Todo el personal de la fábrica de tapas y preformas IBERPLAST S.A.S., por su colaboración y ayuda en este proyecto.

Jenny Marcela Lizarazo Castellanos, Químico y directora del trabajo de grado por sus aportes, orientación y conocimiento a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A todos nuestros profesores que a lo largo de la carrera nos brindaron toda su sabiduría y experiencia.

A la Universidad de América por acogernos durante toda nuestra carrera y permitir nuestra formación como Ingenieras Químicas.

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi madre **Nelly Astrid Contreras Fajardo**, por todo su esfuerzo y dedicación para permitirme alcanzar este gran logro. Por sus consejos, por su apoyo y la fuerza que me dio en los momentos difíciles para seguir adelante en toda la etapa de formación, no sólo como ingeniera sino como ser humano. Gracias por educarme con paciencia y amor, por querer hacer de mí una mejor persona cada día, y por ser ejemplo de perseverancia y mujer integra.*

*A mi padre **Carlos Andrés Díaz Páez** que, a pesar de estar en el cielo, fue junto con mi madre el motor para sacar adelante este sueño, y así darle cumplimiento a su deseo de ser una hija dedicada al estudio y que lo hiciera sentir orgulloso. A **Lupita Díaz**, que, aunque partió inesperadamente, siempre me cuidó mientras hacía trabajos, con su amor incondicional me dio felicidad y me demostró el verdadero significado de la lealtad.*

*A mi mejor amiga y compañera de trabajo, **Paula Alejandra Parra Landinez**, por su entrega y compromiso en todo este camino lleno de altibajos, pero que logramos completar. Gracias por su confianza, por sus consejos y nuestra amistad verdadera. Me enorgullece saber que culminaremos esta etapa juntas.*

Jeimmy Paola Díaz Contreras

DEDICATORIA

En agradecimiento al autor de mi camino, mi padre celestial, el que me ha dado la oportunidad y la bendición de cumplir con esta gran meta.

A mis padres Jasmin Landinez y Jaime Parra por su esfuerzo y guía durante toda mi vida. A mi hermanito que adoro y daría mi vida por él, Jonathan Parra, quien ha sido y siempre será mi motor.

A mis tías Clariveth Parra y Nancy Parra, que estuvieron compartiendo conmigo a lo largo de toda mi carrera. Y fueron testigos de la dedicación y empeño para sacar mi carrera adelante.

A David Enciso por su paciencia y apoyo incondicional en momentos buenos y difíciles.

A Jenny Lizarazo por su incondicional ayuda, por su apoyo y sus consejos. Por ser un ejemplo a seguir.

A mi amiga y compañera de tesis Jeimmy Díaz, por el tiempo, ánimo y dedicación, quien se ha convertido en parte fundamental de mi vida.

Paula Alejandra Parra Landinez

CONTENIDO

| | pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| OBJETIVOS | 24 |
| 1. GENERALIDADES | 25 |
| 1.1 MISIÓN | 25 |
| 1.2 VISIÓN | 25 |
| 1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ENVASES PET EN IBERPLAST S.A.S. | 25 |
| 1.3.1 Materia prima. | 28 |
| 1.3.2 Proceso de inyección de preformas. | 28 |
| 1.3.3 Proceso de moldeo por soplado. | 30 |
| 1.3.4 Excedentes industriales. | 31 |
| 1.3.5 Reciclaje mecánico. | 31 |
| 1.3.6 Control de calidad. | 32 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 34 |
| 2.1 POLIETILENTEREFTALATO | 34 |
| 2.1.1 Usos y aplicaciones | 36 |
| 2.2 POLIETILENTEREFTALATO EN ESTADO AMORFO | 37 |
| 2.2.1 Propiedades fisicoquímicas. | 38 |
| 2.2.1.1 Viscosidad intrínseca. | 39 |
| 2.2.1.2 Concentración de acetaldehído. | 40 |
| 2.2.1.3 Densidad. | 44 |
| 2.2.1.4 Índice de fluidez. | 45 |
| 2.2.2 Propiedades mecánicas. | 46 |
| 2.2.2.1 Resistencia a la compresión vertical de botellas PET. | 46 |
| 2.2.2.2 Resistencia a la presión interna de botellas PET. | 46 |
| 2.2.3 Degradación térmica. | 46 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.4 | Degradación hidrolítica. | 47 |
| 3. | CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE PET EN ESTADO AMORFO OBTENIDO DE EXCEDENTES INDUSTRIALES | 48 |
| 3.1 | ELABORACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO | 48 |
| 3.1.1 | Medición de viscosidad intrínseca, densidad e índice de fluidez. | 48 |
| 3.1.2 | Medición de concentración de acetaldehído. | 51 |
| 3.2 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 53 |
| 4. | DIAGNÓSTICO DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE PREFORMAS Y BOTELLAS NO RETORNABLES FABRICADAS CON LA DOSIFICACIÓN ACTUAL DE PET AMORFO | 57 |
| 4.1 | PREFORMA | 57 |
| 4.1.1 | Medición de viscosidad intrínseca. | 57 |
| 4.1.2 | Medición de concentración de acetaldehído. | 58 |
| 4.2 | BOTELLA NO RETORNABLE PARA BEBIDAS | 59 |
| 4.2.1 | Medición de resistencia a la compresión vertical. | 59 |
| 4.2.2 | Medición de resistencia a la presión interna | 62 |
| 4.3 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 66 |
| 5. | ESTABLECIMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL DE INCREMENTO DE PET EN ESTADO AMORFO CON CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO EN LA EMPRESA | 68 |
| 5.1 | REALIZACIÓN DE DOS ENSAYOS INDUSTRIALES CON DOSIFICACIÓN DEL 5% Y 8% DE PET EN ESTADO AMORFO | 69 |
| 5.2 | INYECCIÓN DE PREFORMA | 69 |
| 5.2.1 | Inspección atributiva. | 69 |
| 5.2.2 | Medición de viscosidad intrínseca. | 69 |
| 5.2.3 | Medición de concentración de acetaldehído | 70 |
| 5.3 | SOPLADO DE BOTELLA NO RETORNABLE PARA BEBIDAS | 71 |
| 5.3.1 | Medición de resistencia a la compresión vertical. | 71 |
| 5.3.2 | Medición de resistencia a la presión interna. | 71 |
| 5.4 | DESARROLLO EXPERIMENTAL | 72 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4.1 | Realización análisis comparativo estadístico de resultados. | 73 |
| 5.4.2 | Establecimiento de dosificación de PET en estado amorfo con cumplimiento de especificaciones técnica de producto en la empresa. | 76 |
| 5.4.3 | Comparación de resultados de botella y preforma con dosificación de PET en estado amorfo actual y la establecida | 78 |
| 6. | ANÁLISIS FINANCIERO | 82 |
| 6.1 | DATOS INDUSTRIALES | 82 |
| 6.1.1 | Costo y cantidad de materia prima virgen para fabricación de preforma. | 82 |
| 6.1.2 | Cantidad de PET en estado amorfo con dosificación actual utilizada en proceso. | 82 |
| 6.2 | CÁLCULO DE DISMINUCIÓN DE COSTOS DE COMPRA DE RESINA HOMOLOGADA | 83 |
| 6.3 | ANÁLISIS DE COSTOS | 83 |
| 7. | CONCLUSIONES | 85 |
| 8. | RECOMENDACIONES | 87 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 88 |
| | ANEXOS | 93 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. VI, densidad y MFR de PET en estado amorfo | 50 |
| Tabla 2. Concentración de acetaldehído de PET en estado amorfo. | 53 |
| Tabla 3. Rango de propiedades fisicoquímicas de PET en estado amorfo | 56 |
| Tabla 4. VI de preforma con 3% de PET en estado amorfo | 58 |
| Tabla 5. Concentración de AA de preforma con 3% de PET en estado amorfo | 59 |
| Tabla 6. Resistencia a la compresión vertical de botella con 3% de PET en estado amorfo | 62 |
| Tabla 7. Resistencia a la presión interna de botella con 3% de PET en estado amorfo | 66 |
| Tabla 8. VI de preforma con 5% y 8% de PET en estado amorfo | 69 |
| Tabla 9. Concentración de AA de preforma con 5 y 8% de dosificación de PET amorfo | 70 |
| Tabla 10. Resistencia a la compresión vertical de botella con 5% y 8% de PET en estado amorfo | 71 |
| Tabla 11. Resistencia a la presión interna de botella con 5% y 8% de PET en estado amorfo | 72 |
| Tabla 12. Excedentes industriales producidos y consumidos en los meses de agosto a diciembre de 2019 | 82 |
| Tabla 13. Ahorro en compra de resina virgen con dosificación de 5% de peletizado | 83 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Inyección de preforma | 29 |
| Figura 2. Alimentación a moldes por tornillo extrusor | 29 |
| Figura 3. Preformas PET | 30 |
| Figura 4. Principio del proceso de moldeo por soplado | 31 |
| Figura 5. Síntesis de PET a partir de ácido tereftálico y etilenglicol | 35 |
| Figura 6. Productos del proceso de policondensación | 35 |
| Figura 7. Estructura molecular: estado cristalino vs. estado amorfo | 38 |
| Figura 8. Rangos de viscosidad intrínseca de diferentes grados de PET | 40 |
| Figura 9. Degradación térmica de grupos terminales hidroxiethyl | 42 |
| Figura 10. Mecanismo de degradación térmica del PET | 43 |
| Figura 11. Cambio de densidad de plástico amorfo | 45 |
| Figura 12. Gránulos de PET en estado amorfo | 49 |
| Figura 13. Preparación muestras PET en estado amorfo | 49 |
| Figura 14. Indexador de fusión Dynisco® LMI4000 | 50 |
| Figura 15. Molino centrífugo Restch ZM200 | 52 |
| Figura 16. Preparación de muestras de PET en estado amorfo en viales | 52 |
| Figura 17. Cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus® 580 | 53 |
| Figura 18. Equipo para ensayos universales – Instron | 60 |
| Figura 19. Botella con 3% de peletizado en posición para iniciar prueba | 61 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20. Botella con 3% de peletizado deformada luego de recibir carga máxima | 61 |
| Figura 21. Equipo Atrya BR-6000P | 63 |
| Figura 22. Inicio de prueba de resistencia a la presión interna de botella con 3% de peletizado | 64 |
| Figura 23. Botella con 3% de peletizado en proceso de llenado de agua | 64 |
| Figura 24. Base de botella con dosificación de 3% de peletizado, sin rotura ni fisura | 65 |
| Figura 25. Botella con 3% de PET en estado amorfo antes y después de la prueba | 65 |
| Figura 26. Gránulos de PET virgen | 68 |
| Figura 27. Botella de PET con prueba fallida | 72 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Gráfica 1. Viscosidad Intrínseca vs. Densidad | 55 |
| Gráfica 2. Viscosidad Intrínseca vs. Índice de Fluidéz | 56 |
| Gráfica 3. VI ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo. | 73 |
| Gráfica 4. Concentración de AA en ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo. | 74 |
| Gráfica 5. Resistencia a la compresión vertical en ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo. | 75 |
| Gráfica 6. Resistencia a la presión interna en ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo. | 76 |
| Gráfica 7. Viscosidad intrínseca con 3% y 5% de PET en estado amorfo. | 78 |
| Gráfica 8. Concentración de AA con 3% y 5% de PET en estado amorfo. | 79 |
| Gráfica 9. Resistencia a la compresión vertical en ensayos industriales con 3% y 5% de PET en estado amorfo. | 80 |
| Gráfica 10. Resistencia a la presión interna en ensayos industriales con 3% y 5% de PET en estado amorfo. | 81 |

LISTA DE DIAGRAMAS

| | pág. |
|---------------------------------------------------|------|
| Diagrama 1. PFD fabricación de envases PET | 27 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Anexo A. Cromatograma del pet en estado amorfo | 94 |
| Anexo B. Molde husky de inyección de preforma de 40g y 50g | 95 |
| Anexo C. Cromatograma de preforma con 3% de pet en estado amorfo | 96 |
| Anexo D. Curva de comportamiento de la resistencia a la carga vertical de preforma con 3% de pet en estado amorfo | 97 |
| Anexo E. Cromatograma de preforma con 5% de pet en estado amorfo | 98 |
| Anexo F. Cromatograma de preforma con 8% de pet en estado amorfo | 99 |
| Anexo G. Curva de comportamiento de la resistencia a la carga vertical de preforma con 5% de pet en estado amorfo | 100 |
| Anexo H. Curva de comportamiento de la resistencia a la carga vertical de preforma con 8% de pet en estado amorfo | 101 |

LISTA DE ABREVIATURAS

AA: Acetaldehído.

MFR: Índice de fluidez.

min: minutos.

NI: Norma de Inspección

NO: Norma de Operación.

PE: Prueba y Ensayo.

PET: Polietilentereftalato.

ppm: Partes por millón.

rpm: Revoluciones por minuto.

VI: Viscosidad intrínseca.

GLOSARIO

BEBIDA CARBONATADA: es una bebida (con gas) que contiene dióxido de carbono, el cual se libera al abrirse ésta, debido a que pierde presurización y ocasiona burbujas, fenómeno denominado como efervescencia.

BIG-BAG: los FIBC (*Flexible Intermediate Bulk Containers*), comúnmente conocidos como *big-bags*, son contenedores industriales fabricados de tela flexible diseñados para almacenar y transportar gránulos de plásticos como el PET.

BOTELLA NO RETORNABLE: envase que no puede ser retornado para ser reutilizado luego de su uso.

CONCENTRACIÓN DE ACETALDEHÍDO: contenido de acetaldehído en preformas, el cual se genera normalmente en la fase de procesamiento del plástico por fricción en tornillo extrusor, y degradación térmica de la resina debido a alta temperatura.

DEGRADACIÓN TÉRMICA: descomposición química de materiales como el plástico cuando se aplica calor, generando la ruptura de los enlaces covalentes de la cadena o de los grupos laterales de los polímeros como consecuencia del aumento de la temperatura.

ESTADO AMORFO: hace referencia a la agrupación de macromoléculas lineales o ramificadas, sin que exista un principio ordenador de las cadenas moleculares del polímero, tal como el PET peletizado.

EXCEDENTES INDUSTRIALES: producto inherente al proceso, semielaborado o final no conforme o torta, que puede ser recuperable o no, proveniente de inicios de producción o de ajustes en los procesos. Preformas y botellas que no cumplen las especificaciones técnicas establecidas en el manual de calidad de la empresa.

MATERIAL PELETIZADO: material de PET reciclado que se encuentra en estado amorfo.

MOLDEO POR INYECCIÓN: proceso semicontinuo de inyección de un polímero en estado fundido en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado compuerta, y del cual se obtiene la preforma.

MOLDEO POR SOPLADO: proceso de fabricación de piezas de plástico huecas (botellas) en el que se utiliza la presión del aire para expandir la preforma en la cavidad de un molde.

PET NO RETONABLE: resina plástica usada para la fabricación de botellas que se usan una única vez.

POLIETILENTEREFTALATO (PET): polímero termoplástico lineal, con alto grado de cristalinidad, obtenido por policondensación, perteneciente a los materiales sintéticos (poliésteres) y compuesto de petróleo crudo, gas y aire.

PREFORMA: producto intermedio del cual se obtienen las botellas plásticas, mediante moldeo por soplado, y que varían en tipo de rosca (boca de la botella), peso, color y forma.

RECICLAJE MECÁNICO: procedimiento en el que los excedentes industriales son reprocesados, con el fin de obtener productos terminados o materiales a partir de plástico residual, con características de desempeño menores a los del material original.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN VERTICAL: es el máximo esfuerzo que un material rígido puede resistir bajo compresión vertical. Es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o la carga de apilado que puede soportar el envase plástico sin que se deforme.

RESISTENCIA A LA PRESIÓN INTERNA: es una prueba de estrés (como prueba de explosión de botella) para observar la resistencia del PET al aumentar la presión interna de la botella. En un ensayo técnico empleado para asegurar que los envases cumplan con las especificaciones de la industria.

SEPTA: disco para tapones de rosca o tapones a presión que permite encapsular la muestra, garantizando un sellado altamente inerte y no reactivo, junto con un ajuste firme y seguro en el instrumento analítico.

VISCOSIDAD INTRÍNSECA: es un número relativo y representa una medida del peso molecular promedio del PET, la cual depende de la longitud de sus cadenas poliméricas. Se utiliza para asignar un valor de viscosidad relativa a los diversos grados y aplicaciones de PET.

RESUMEN

Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del Polietilentereftalato en estado amorfo, obtenido de excedentes industriales, para la fabricación de botellas no retornables. De lo anterior, se definió para el peletizado una viscosidad intrínseca de 0.538 ± 0.024 dL/g, concentración de acetaldehído de 4.00 ± 2.00 ppm, densidad de 1.53 ± 0.05 g/cm³ e índice de fluidez de 129 ± 22 g/10min.

En segundo lugar, se determinaron las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de preformas y botellas no retornables de 2L, fabricadas con la dosificación actual de 3% de PET en estado amorfo. Se obtuvo 0.830 ± 0.015 dL/g de viscosidad intrínseca, 2.32 ± 0.605 ppm de concentración de acetaldehído, resistencia a la compresión vertical de 29.98 ± 1.72 kg-F y, sin falla de ninguna botella en la prueba de resistencia a la presión interna a 135 psi durante 13 segundos.

En tercera instancia, se realizaron dos ensayos industriales con 5% y 8% de peletizado y los resultados se analizaron mediante un desarrollo experimental, teniendo como variables dependientes VI, concentración de AA, la resistencia a la carga vertical y resistencia a la presión interna. Con lo anterior, se estableció la dosificación de 5% de PET en estado amorfo, la cual da cumplimiento a las especificaciones técnicas de producto de la empresa.

Finalmente, basados en los datos industriales del periodo comprendido entre agosto y diciembre de 2019 y, con la dosificación de 5% de PET en estado amorfo establecida a nivel industrial, se realizó un análisis de costos el cual reflejó un ahorro de 40.000 \$USD equivalente a 50 toneladas menos de compra de resina virgen respecto a la dosificación actual de 3% de peletizado.

Palabras Claves: botellas no retornables, concentración de acetaldehído, dosificación de Polietilentereftalato (PET), estado amorfo, excedentes industriales, Iberplast S.A.S., moldeo por inyección-soplado, reciclaje mecánico, resistencia a la presión, resistencia a la compresión vertical, viscosidad intrínseca.

INTRODUCCIÓN

Las botellas plásticas tienen como propósito contener y proteger distintos productos líquidos, tales como las bebidas carbonatadas. En Colombia, la industria de plásticos ha estado en constante crecimiento durante los últimos años; Daniel Restrepo, presidente de Acoplásticos, señaló que para el 2018 se registró un aumento en la fabricación de productos del 2,5%, el cual se espera que siga incrementando¹.

A causa del aumento de producción de este material y su aplicación en los diferentes envases de un solo uso, también han aumentado sus residuos e impacto negativo al medio ambiente, por el largo tiempo que requiere su degradación, es por ello que el reciclaje en todas sus fases es un reto actual para las empresas productoras. Por tanto, es necesario aumentar el reintegro de materiales como el Polietilentereftalato en estado amorfo, proveniente del reciclaje mecánico de los excedentes industriales, en el proceso de inyección y soplado con el fin de disminuir gastos energéticos en el proceso de reciclado (al evitar el paso por la etapa de cristalización), bajar costos de producción y minimizar su impacto ambiental.

Teniendo como base esta realidad, se planteó el evaluar a nivel laboratorio los efectos que genera el incremento de dosificación de Polietilentereftalato (PET) en estado amorfo, obtenido por reciclaje mecánico, en las propiedades fisicoquímicas y la estabilidad mecánica de botellas no retornables, mediante el proceso de moldeo por inyección y soplado en la empresa IBERPLAST S.A.S. Ligado a los beneficios económicos que trae consigo el aprovechamiento del material en cuestión. De esta manera, la empresa tendría mayor capacidad para seguir dando cumplimiento al proceso circular, enmarcado en la certificación que poseen en el Sistema de Gestión de Basura Cero, y así mismo desarrollar de manera eficaz su reciclaje mecánico.

En el estudio se seleccionó la referencia de botella para bebida carbonatada con gramaje de preforma alto, debido a su viabilidad de aplicación para envasar este tipo de producto y siendo la referencia a la cual se le incluye un porcentaje de PET reciclado postindustrial en la empresa. Otros tipos de referencia de botella son más sensibles a un aumento de acetaldehído, dado que sus propiedades fisicoquímicas se deben encontrar en rangos más pequeños. Ejemplo de lo anterior es la referencia para agua potable, que requiere concentraciones de acetaldehído menores a 4ppm y el uso de aditivos reductores de esta impureza, por lo cual no es viable el uso de PET reciclado mecánicamente.

¹ MITCHELL, Daniel. GREMIO ACOPLÁSTICOS ACELERARÁ LA AGENDA AMBIENTAL EN EL PAÍS. [En línea], 2018 [Consultado el 1-09-2019]. Disponible en: <<http://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-noti/131-ns-170724>>

En el presente trabajo se encontrarán: las generalidades y descripción del proceso de fabricación de envases PET en la empresa, la teoría relacionada con la materia prima junto con sus aplicaciones industriales, y las propiedades fisicoquímicas y mecánicas medibles en la preforma y botella. Además, los resultados de las mediciones de propiedades fisicoquímicas del PET en estado amorfo, obtenido de excedentes industriales; el diagnóstico de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de preformas y botellas no retornables fabricadas con la dosificación actual de PET amorfo; los resultados del desarrollo experimental para el establecimiento a nivel industrial del incremento de peletizado y su posterior análisis financiero en términos de disminución de costos de compra de resina virgen.

Para tal efecto, se caracterizó fisicoquímicamente el PET en estado amorfo, con el fin de tener conocimiento del material y su influencia en el proceso. Así mismo, se determinaron las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las preformas y botellas no retornables fabricadas con la dosificación actual de PET en estado amorfo. Luego, se estableció a nivel industrial el incremento de PET en estado amorfo que diera cumplimiento a las especificaciones técnicas de producto de la empresa, realizando 10 mediciones en el diseño experimental. Finalmente, se realizó un análisis de costos teniendo en cuenta el incremento de dosificación de PET en estado amorfo anteriormente establecido.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el incremento de dosificación de Polietilentereftalato en estado amorfo, obtenido por reciclaje mecánico, al proceso de inyección y soplado de botellas no retornables en Iberplast S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del Polietilentereftalato en estado amorfo, obtenido de excedentes industriales, para la fabricación de botellas no retornables.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de preformas y botellas no retornables, fabricadas con la dosificación actual de Polietilentereftalato en estado amorfo.
- Establecer a nivel industrial el incremento de Polietilentereftalato en estado amorfo, que cumpla con las especificaciones técnicas de producto de la empresa, mediante un desarrollo experimental.
- Realizar un análisis de costos con el incremento de dosificación de Polietilentereftalato en estado amorfo establecido a nivel industrial.

1. GENERALIDADES

Con el fin de dar un panorama y tener conocimiento de la empresa en la que se desarrollará el proyecto en cuestión, se presenta en este capítulo sus generalidades corporativas, tales como misión y visión, el proceso de producción de envases PET incluido los principales aspectos como materia prima, proceso de inyección y soplado, excedentes industriales y su respectivo reciclaje mecánico, y el control de calidad del producto final.

1.1 MISIÓN

En Iberplast S.A.S. mediante la utilización eficiente de nuestro excelente talento humano que está en permanente formación, de los recursos físicos disponibles y de la más avanzada tecnología en sus equipos, trabajamos para producir y comercializar envases y empaques elaborados con resinas plásticas, acero cromado o aluminio, y la prestación de servicios de impresión en lámina metálica que cumplan las normas nacionales e internacionales, o acuerdos privados de calidad, trabajando siempre con responsabilidad y respeto por los clientes, los colaboradores, la comunidad y el medio ambiente, tomando siempre como base los objetivos y las políticas de los accionistas, para afianzar nuestra posición en el mercado nacional y expandirnos a nivel internacional².

1.2 VISIÓN

“Ser la empresa líder en el mercado nacional y reconocida internacionalmente en la industria de envases y empaques plásticos y metálicos (acero o aluminio), con estándares y normas de categoría mundial en armonía con la calidad y el medio ambiente con decidido trabajo en equipo, proyectándonos a nivel subregional e internacional la imagen de la compañía”³.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ENVASES PET EN IBERPLAST S.A.S.

Se presenta la descripción del proceso de fabricación de envases PET en la empresa (véase diagrama 1), con el fin de conocer y contextualizar los objetivos planteados del proyecto en cuestión. Cabe mencionar que, el diagrama de flujo de

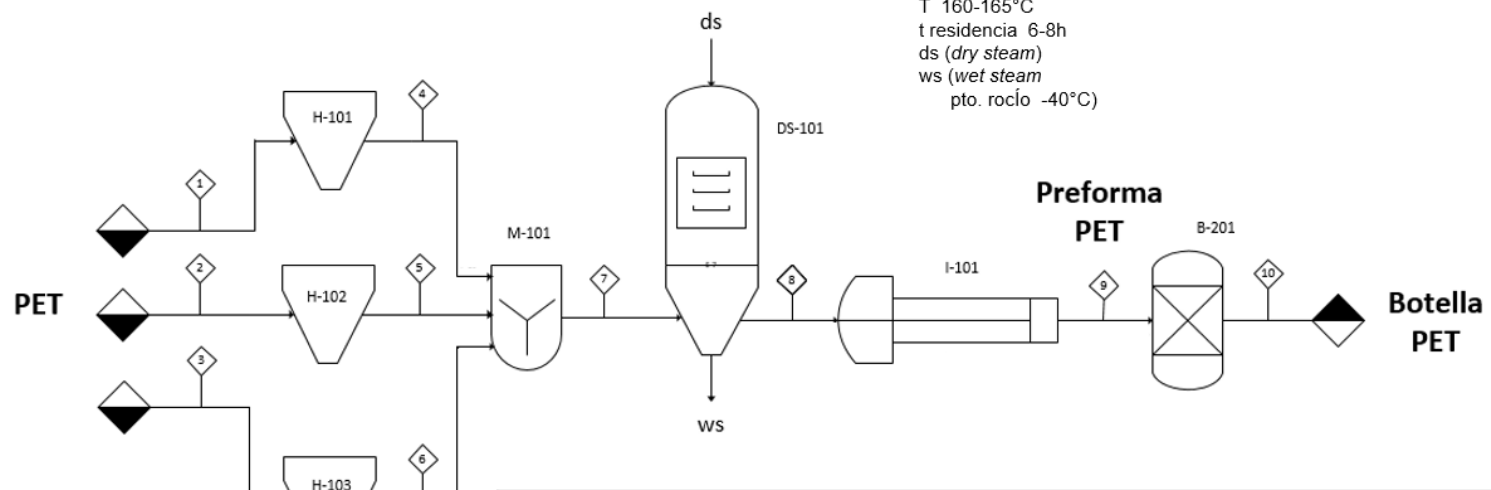
² BENÍTEZ, Eileen. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA 5S's de LEAN MANUFACTURING EN EL ÁREA DE INYECCIÓN DE PREFORMAS DE IBERPLAST S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, 2012. p.29.

³ BENÍTEZ, Op. cit., p.29.

proceso se divide en dos secciones: la sección 100 correspondiente al proceso de inyección de preforma y la sección 200 referente al moldeo por soplado.

Diagrama 1. PFD fabricación de envases PET

H-101 Tolva 1 (Filtrado PET virgen)
H-102 Tolva 2 (Filtrado PET amorfo)
H-103 Tolva 3 (Filtrado EKO PET)
M-101 Mezclador
DS-101 Silo secador
 Adsorción con sílica gel
 T 160-165°C
 t residencia 6-8h
 ds (*dry steam*)
 ws (*wet steam*)
 pto. rocío -40°C
I-101 Inyectora T 285°C
B-201 Sopladora T 106 °C



| Núm. Corriente | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
| Temperatura (°C) | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 165 | 60 | 106 |
| Flujo másico (Ton/min) | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.15 | 0.012 | 0.012 | 0.0005 |
| Composición | | | | | | | | | | |
| PET Virgen | 0.99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 |
| PET amorfo | 0 | 0.99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| EKO PET | 0 | 0 | 0.99 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Impurezas | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: elaboración propia

1.3.1 Materia prima. La recepción de materia prima se realiza en los muelles de descarga por parte del área de calidad, donde se reciben *big-bags* de 1000 kg de PET virgen en gránulos, con forma cúbica y 2.5 mm de tamaño aproximadamente; el material se inspecciona atributivamente con el fin de prevenir cualquier tipo de contaminación en el proceso.

En el presente proyecto se utilizó PET en estado amorfo, las referencias de material virgen *Cleartuf Max* y *Polyclear 1101* y de material reciclado postconsumo la resina Eko PET, usadas en botellas para bebidas carbonatadas no retornables las cuales cuentan con propiedades de barrera al CO₂, buen desempeño de expansión y ataque químico (resistencia a la acción de sustancia químicas⁴).

En la primera etapa del proceso se almacena el PET (virgen y reciclado) en silos. Posteriormente, se transporta por medio de una tubería metálica por un sistema de bombas de vacío hasta el dosificador gravimétrico de la máquina de inyección. Por último, el equipo dosificador cuenta con un sistema preestablecido de *software* que permite realizar la mezcla de materiales a diferentes porcentajes.

1.3.2 Proceso de inyección de preformas. (véase figura 1) El proceso inicia cuando el PET, luego de ser dosificado, ingresa a un silo secador donde se retira la mayor cantidad de humedad del material, puesto que el PET es un tipo de plástico que absorbe humedad, por lo general su contenido de agua es de aproximadamente 0.05%. Para obtener preformas perfectas de PET (transparencia y rendimiento físico) y para mejorar la eficiencia del moldeo, el contenido de agua de la resina de PET debe ser $\leq 0.005\%$, por lo que se requiere de secado⁵; la temperatura se encuentra en un rango de 160°C a 165°C y durante un tiempo de 6 a 8 horas, según la referencia de resina que será utilizada, teniendo en cuenta que “el tiempo de secado no debe exceder de 7 a 8 horas, ya que un secado con tiempo largo reducirán el valor de VI”⁶.

El PET seco es alimentado a una máquina inyectora, el cual es fundido mediante un tornillo extrusor que los transporta para ser inyectado en un molde (véase figura 2). Luego de que el material fundido se encuentra en las cavidades del molde, éste se cierra. Posteriormente, el molde de la preforma es enfriado por un sistema de agua refrigerada con la ayuda de un *chiller* (enfriador; máquina que elimina el calor de un líquido mediante un ciclo de refrigeración por compresión o absorción de

⁴ SIERRA, Noralba., *et al.* Protocolo para el control de calidad de envases plásticos, utilizados en la industria farmacéutica, de cosméticos y de alimento. En: Revista Colombiana de Ciencias Químico – Farmacéuticas. 25, octubre, 2010. vol. 39 (2). p. 155.

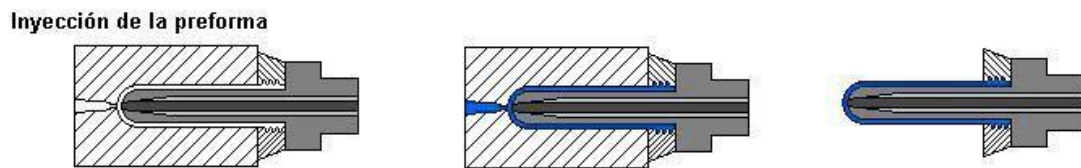
⁵ HERNÁNDEZ, Juan Carlos. Nota Técnica: Principio de funcionamiento del sistema de inyección y análisis para la comprensión de la influencia del defecto rebaba de preformas PET. En: Revista Ingeniería UC. Enero-abril, 2013. vol. 20 (1). p.45

⁶ *Ibíd.*, p. 45.

vapor) con “temperatura de agua de refrigeración de entre 15 y 200°C y presión de alrededor de 5 bar”⁷, permitiendo mantener el circuito cerrado del agua del proceso y logrando que la masa moldeada se enfríe y solidifique⁸.

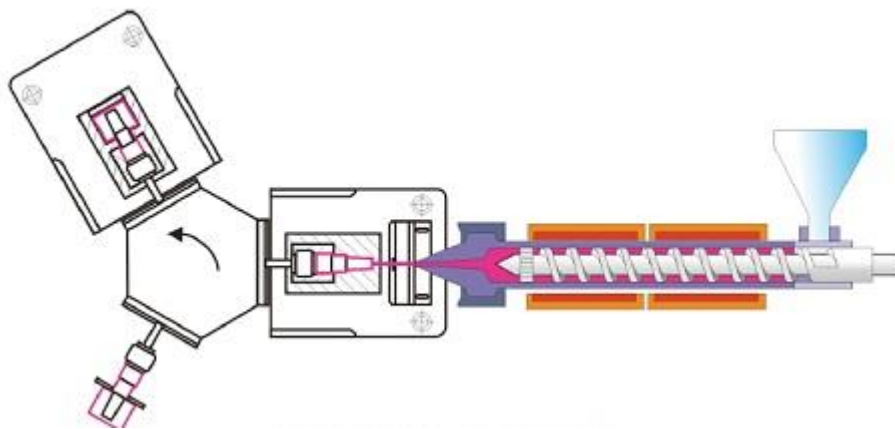
Existe gran variedad de moldes que proporcionan el tamaño y peso a la preforma que se desee fabricar (véase figura 1) y “las tres variables que rigen este proceso son: la presión, la temperatura y el tiempo”⁹.

Figura 1. Inyección de preforma.



Fuente: TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Inyección – soplado. [En línea] Marzo, 2012 [Consultado el 25-09-2019]. Disponible de internet: <<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/03/inyeccion-soplado.html>>

Figura 2. Alimentación a moldes por tornillo extrusor.



Fuente: TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Inyección – soplado. [En línea] Marzo, 2012 [Consultado el 25-09-2019]. Disponible de internet: <<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/03/inyeccion-soplado.html>>

⁷ Ibíd., p. 45.

⁸ Ibíd., p. 43.

⁹ HERNÁNDEZ. Op. cit., p. 42.

Figura 3. Preformas PET.



Fuente: IBERPLAST S.A.S. Preformas PET. [En línea], 2019 [Consultado el 02-10-2019]. Disponible de internet: <<https://www.iberplast.com.co/division-plastica/preformas>>

1.3.3 Proceso de moldeo por soplado. En el proceso de moldeo por soplado con estiramiento SBM (*Stretch Blow Molding*), ilustrado en la figura 4, el plástico se moldea inicialmente en una preforma por inyección. Estas preformas producen los cuellos de las botellas y su respectivo acabado en el extremo.

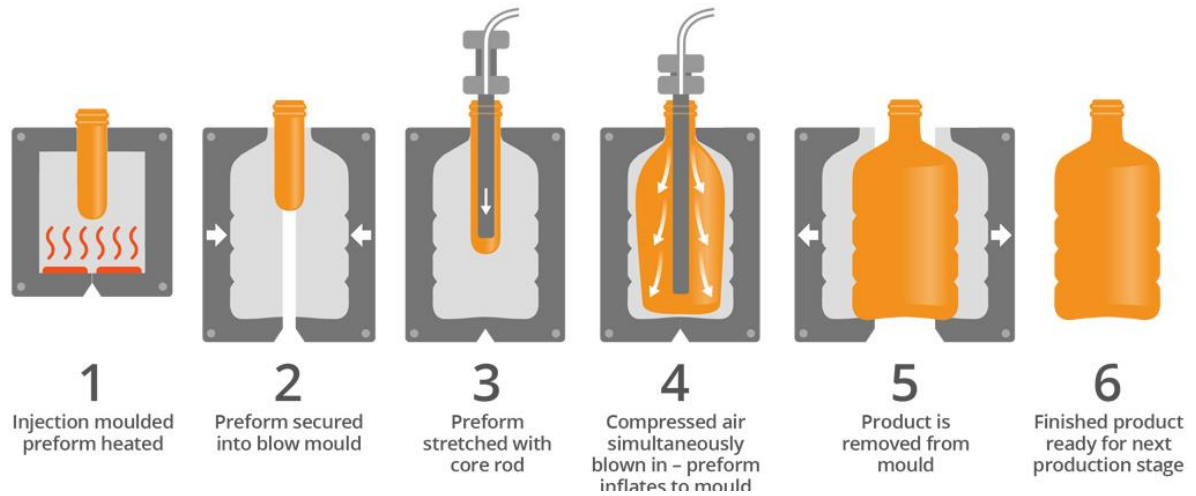
En el procedimiento, las preformas se calientan por lo general usando calentadores de infrarrojos por encima de su temperatura de transición vítrea T_g (“región donde los polímeros amorfos pierden un porcentaje significativo de sus propiedades de capacidad de carga”¹⁰, es decir, pasa de un estado rígido y quebradizo a un estado blando y maleable). Después, la botella se infla usando aire a alta presión por medio de moldes de soplado de metal. La preforma se estira siempre con una barra de núcleo como parte del proceso, para obtener finalmente la botella.

El estiramiento de algunos polímeros como el PET, arrojan resultados positivos respecto al endurecimiento por deformación de la resina, permitiendo que las botellas resistan la deformación a las presiones generadas por las bebidas carbonatadas, que normalmente se aproxima a 60 psi de presurización¹¹.

¹⁰ SEPE, Michael. Poliésteres PBT y PET: la cristalinidad hace la diferencia. [En línea], 29, septiembre, 2012 [Consultado el 10-10-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/columnas/polisteres-pbt-y-pet-la-cristalinidad-hace-la-diferencia>>

¹¹ HERNÁNDEZ. Op. cit., p. 50.

Figura 4. Principio del proceso de moldeo por soplado.



Fuente: MAVERICK PDM. *Plastic Blow Molding*. [En línea], 2018 [Consultado el 23-11-2019]. Disponible de internet: <<https://www.maverickpdm.com/blow-molding-learning-center>>

1.3.4 Excedentes industriales. Los excedentes industriales del proceso de moldeo por inyección y soplado, hacen referencia al producto semielaborado o final no conforme o torta que puede ser recuperable o no, que proviene de inicios de producción o de ajustes en los procesos, por lo tanto, serán inherentes al mismo.

La preforma o botella recuperable es fabricada con resina de llenado en caliente, resina retornable o no retornable, incluyendo a su vez las que posean aditivos. Mientras que, el material no recuperable hace referencia a las tortas, preformas con pigmentos o quemadas.

Los materiales que se clasifiquen como recuperables, se separan según la referencia de resina y son almacenados en cajas de cartón sin tener contacto directo con el piso. Dicho material debe encontrarse en buen estado, limpio, libre de grasa y de mezclas con material no recuperable (ya que éste lo puede contaminar).

1.3.5 Reciclaje mecánico. Según Joachim, *et al.*¹², el reciclaje mecánico ha surgido como la opción más económica, así como la más energética y ecológicamente eficiente. Dentro de este se encuentra el reciclaje primario, donde los productos preconsumo se introducen de nuevo a la extrusión del proceso, existen en una materia prima única, y son bien identificados, limpios y homogéneos. Mientras que, en el reciclaje secundario, el nuevo material reciclado se puede

¹² MARIS, Joachim, *et al*, *Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes*. En: *Revista Polymer Degradation and Stability*. 2017. DOI: 10.6100/IR783771.

convertir en nuevos productos plásticos, sustituyendo por una porción de polímeros vírgenes, con el fin de que sean adecuados, se mitigue la degradación del polímero y no afecte el proceso.

En Iberplast S.A.S. los excedentes industriales de PET, inherentes al proceso y también denominado material preconsumo (ya que no ha estado en contacto con producto u otros materiales requiriendo menores ciclos de lavado¹³) son recolectados diariamente y llevados a un área de recuperado, dentro de la misma empresa, con el fin de ser reciclados mecánicamente para su reintegro. El reciclado de PET que se realiza consta de tres etapas en serie: molido, peletizado y cristalizado. La diferencia del material obtenido peletizado y el cristalizado se encuentra en su estructura molecular y, por ende, en sus propiedades químicas, físicas y mecánicas que afectan su procesamiento y al producto final.

Por un lado, el material peletizado, obtenido del reciclaje mecánico, es un polímero en estado amorfo de bajo peso molecular, debido a la degradación mecánica y térmica que ha sufrido con el procesamiento repetitivo, por esta razón pasa a la siguiente fase que pretende la recuperación y cristalización de sus cadenas moleculares.

El cristizador es el equipo usado por la empresa para la última etapa del proceso de reciclaje mecánico; ésta inicia con la alimentación de material peletizado al silo por un sistema de vacío, el cual transporta el material desde el *big-bag* para llenar el silo hasta la primera mirilla, con el fin de calentar y agitar el PET a una temperatura de 160°C +/- 10°C. El tiempo de calentamiento dura 2 horas aproximadamente, donde se modifican las propiedades del PET para mejorar su desempeño. Luego, pasa a tolva de enfriamiento para nuevamente ser empacado en un *big-bag*¹⁴.

1.3.6 Control de calidad. La empresa realiza control de calidad desde la materia prima hasta el producto terminado, para ello cuenta con documentos digitales normalizados, dando cumplimiento a la certificación en ISO 9001, los cuales incluyen las rutas de calidad que se deben cumplir en producción y las distintas inspecciones atributivas, cualitativas y cuantitativas que se deben realizar. Entre los documentos existentes y que se tomarán como guía dentro del presente trabajo, se encuentran las Normas de Inspección (NI), Normas de Operación de equipos (NO),

¹³ LIZARAZO, Jenny. Determinación de las condiciones más favorables para el reciclaje mecánico de excedentes industriales del polietileno tereftalato en la empresa Iberplast S.A.S. Trabajo de grado Magister en Diseño y Gestión de Procesos. Bogotá D.C.: Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería, 2019. p.5.

¹⁴ IBERPLAST S.A.S. PROCEDIMIENTO OPERATIVO, DE INSPECCIÓN Y CONTROL DEL PROCESO EN EL CRISTALIZADOR. 2019. NO 44011.

y Pruebas y Ensayos (PE) de los procedimientos de medición de propiedades fisicoquímicas y mecánicas, junto con sus respectivos equipos.

2. MARCO TEÓRICO

Para tener un panorama respecto a los términos y conceptos que se emplearán en el presente trabajo y comprender de mejor manera los resultados que de éste se obtengan, en el presente capítulo se presenta la descripción del Polietilentereftalato, su proceso de obtención por policondensación y las aplicaciones a nivel industrial, la definición de PET en estado amorfo y sus propiedades fisicoquímicas (viscosidad intrínseca, concentración de acetaldehído, densidad e índice de fluidez), mecánicas (resistencia a la compresión vertical y a la presión interna) y la relación que tienen entre sí. Finalmente, la degradación térmica y la afectación que ésta genera a las propiedades nombradas anteriormente.

2.1 POLIETILENTEREFTALATO

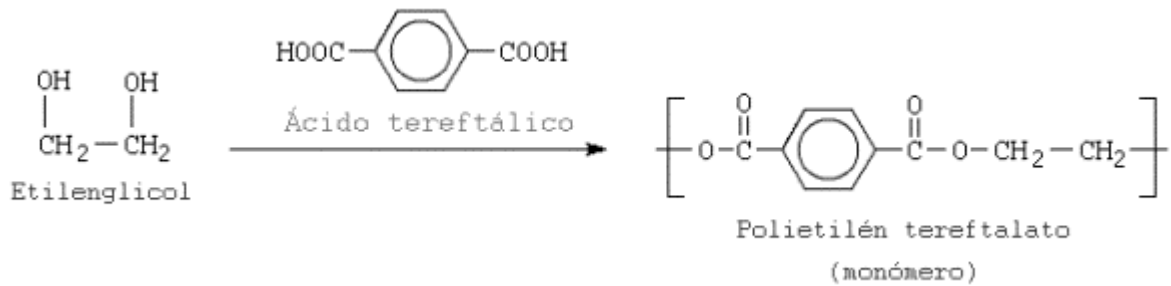
El Polietilentereftalato, conocido por sus siglas en inglés como PET (*polyethylene terephthalate*), es una resina termoplástica polimérica derivada del petróleo; “un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquido del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para forma etilenglicol.”¹⁵.

Este polímero, del grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres, se obtiene químicamente mediante el proceso de **policondensación** entre al ácido tereftálico y el etilenglicol (véase figura 5), teniendo como subproducto de la reacción el agua. En el proceso, también conocido como polimerización por condensación, las sustancias reaccionan para crear uno o más monómeros, los cuales se unen entre sí y forman un dímero, que por reacción con otros monómeros o dímeros (o trímeros...) dan lugar al polímero. Según Almazan¹⁶, los polímeros resultantes de una reacción por condensación se denominan policondensados, en este caso el PET. Debido a que se elimina una molécula, ya sea agua o metanol, algunos átomos del monómero no pasan a ser parte del polímero, entonces se dice que el producto está condensado respecto a su monómero, y el sub producto se denomina condensado. En la figura 6 se presentan los productos de la reacción de policondensación.

¹⁵EDOMEX. ¿Qué es Polietileno-Tereftalato? [En línea], 2018 [Consultado el 20-11-2019]. Disponible de internet: <https://sma.edomex.gob.mx/que_es_polietilenotereftalato>

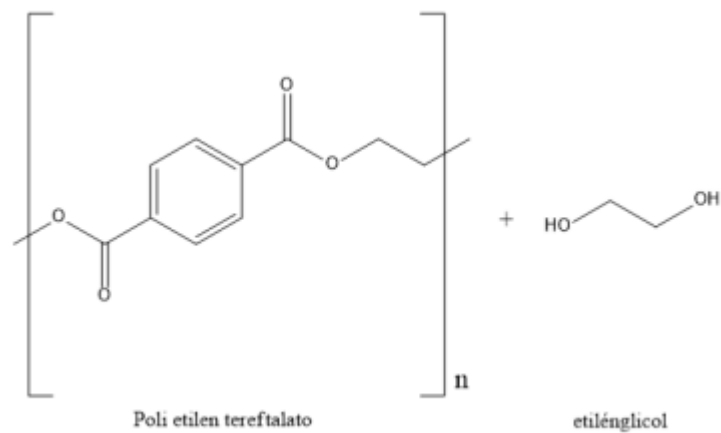
¹⁶ ALMAZAN, Diego. Simulación del proceso de transferencia de calor para el moldeo de preformas de PET. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química, 2018. p.8.

Figura 5. Síntesis de PET a partir de ácido tereftálico y etilenglicol



Fuente: PROCESOS INDUSTRIALES (PET). Síntesis Química del Pet. [En línea], 2013 [Consultado el 27-02-2020]. Disponible en: <<http://ecologia-4-a.blogspot.com/2013/10/sintesis-quimica-del-pet-lospoliesteres.html>>

Figura 6. Productos del proceso de policondensación.



Fuente: ALMAZAN, Diego. Simulación del proceso de transferencia de calor para el moldeo de preformas de PET. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química, 2018, p. 11.

En cuanto a las materias primas se tiene que: el etilenglicol es un líquido incoloro obtenido por síntesis de etileno, que posteriormente se oxida en presencia de catalizadores hasta obtener el óxido de etileno, el cual es altamente reactivo y mediante adición de agua se convierte en etilenglicol, en una reacción altamente exotérmica junto con la generación de dióxido de carbono. "El etilenglicol debe ser

lo más puro posible y libre de residuos de ácidos fuertes o bases para utilizarse en la producción del PET”¹⁷.

Mientras que, el ácido tereftálico es un polvo blanco insoluble en agua y derivado del petróleo, en donde la fracción de benceno por varias etapas de refinación se convierte en paraxileno, el cual se oxida en presencia de catalizadores para obtener ácido tereftálico crudo y posteriormente purificarlo.

Tras la policondensación, “el gránulo obtenido es brillante y transparente porque es amorfo, tiene baja viscosidad (0.55 a 0.65 dL/g), o sea un bajo peso molecular”¹⁸. Por tanto, para incrementar el índice de viscosidad intrínseca se realizan dos etapas adicionales.

La primera etapa adicional es la cristalización y su objetivo es cambiar la estructura del polímero del estado amorfo al cristalino; estos se distinguen entre sí en que el arreglo cristalino el material se torna blanco, lechoso y opaco. “El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico entre 130°C y 160°C, durante un tiempo que puede varias de 10 minutos hasta una hora, mientras el gránulo es mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico”¹⁹.

La segunda etapa es la polimerización en estado sólido, en donde “el granulo cristalizado se carga en un reactor cilíndrico en cuyo interior, durante tiempos muy largos, es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperatura elevada (sobre los 200°C). Este tratamiento cebe una reacción de polimerización que hace aumentar posteriormente el peso molecular de la resina hasta los valores correspondientes idóneos para la fabricación de la botella”²⁰.

2.1.1 Usos y aplicaciones El PET tiene diversos campos de aplicación dentro de los cuales se destacan^{21 22}:

- **Envase y empaque:** Dado su durabilidad, estabilidad dimensional e insensibilidad a la humedad ocupa el 100% del mercado de botellas retornables y no retornable para bebidas carbonatadas y empaques de alimentos, ya que no deteriora ni causa efectos de toxicidad a los productos como: bebidas carbonatadas, agua purificada, aceite, conservas, cosméticas, detergentes, químicos y farmacéuticos.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 8.

¹⁸ *Ibíd.*, p. 11.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 12.

²⁰ *Ibíd.*, p. 12.

²¹ TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Op. cit.

²² EDOMEX. Op. cit.

- **Electro-electrónico:** Debido a su alta resistencia dieléctrica y mecánica se usa en ranuras y fases en motores, condensadores, bobinas y transformadores, y da reemplazo a los materiales termoestables al utilizarse en la fabricación de conectores eléctricos de alta densidad, bloques terminales, circuitos integrados y partes electromecánicas.
- **Fibras:** Por su resistencia, se emplea en la industria textil en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y alfombras. Por su baja elongación y alta tenacidad se aplica en refuerzos para mangueras. Mientras que, por su resistencia química, las cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales se fabrican con este material. Médicamente, dada su fuerza, hace parte de cirugías de reconstrucción de tejidos dañados.
- **Film:** En especial radiografías, tapes de vidrio y audio.
- **Mecánica:** en esta industria hace parte de la fabricación de repuestos que necesitan superficies duras, planas y con buena estabilidad dimensional, tales como engranajes, cojinetes, pistón y batidores de bombas que soportan elevadas fuerzas de impacto. Los compuestos reforzados (PRFV) se usan para producir tapas de distribuidores y componentes de pintura exterior para automóviles.

2.2 POLIETILENTEREFTALATO EN ESTADO AMORFO

Inicialmente es importante resaltar que “no existen polímeros totalmente amorfos o cristalinos, sino que presentan estructuras complejas constituidas de regiones amorfas y cristalinas. Es decir, es imposible lograr un 100% de cristalinidad, ya que los polímeros no tienen un peso molecular uniforme”²³.

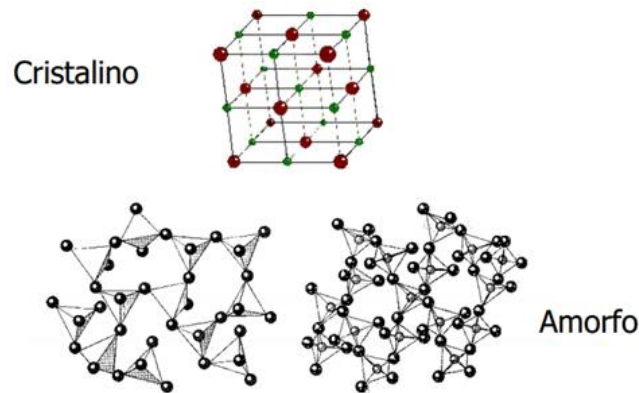
Tomando en cuenta lo anterior, “dependiendo de las condiciones térmicas y de procesamiento a que es sometido el PET, puede existir tanto como un material amorfo o semicristalino por lo que se le puede encontrar en presentación de pellet opaco blanco o transparente, dependiendo del contenido de su región amorfa o cristalina”²⁴. Por tanto, cuando se habla de PET en estado amorfo se hace referencia a un pellet o material transparente que es flexible.

²³ MÉNDEZ, Adrián. La cristalinidad, ¿amigo o enemigo? durante el procesamiento del PET. [En línea], 01, mayo, 2017 [Consultado el 29-11-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/la-cristalinidad-amigo-o-enemigo-durante-el-procesamiento-del-pet>>

²⁴ *Ibíd.*

Respecto al estado amorfo, se trata de un estado donde las moléculas individuales de cadena larga del polímero están desordenadas, es decir, no existe un ordenamiento periódico²⁵; “al ser calentados sufren un proceso paulatino de reblandecimiento en donde a temperatura ambiente suelen ser sólidos rígidos (estado vítreo), y al ser calentados se reblandecen y pasan a ser deformables (estado deformable). Si se aumenta más la temperatura pueden llegar a ser un líquido”²⁶. El paso desde el estado vítreo al estado deformable se conoce como transición vítrea, y la temperatura a la cual se da dicha transformación se denomina temperatura de transición vítrea (Tg). En la figura 7 se visualiza la diferencia de estructura entre un estado cristalino y amorfo.

Figura 7. Estructura molecular: estado cristalino vs. estado amorfo.



Fuente: ANÓNIMO. Sólidos cristalinos y amorfos. [En línea], 2016 [Consultado el 3-12-2019]. Disponible de internet:
[<https://cpig.wordpress.com/2016/04/27/solidos-cristalinos-y-amorfos/>](https://cpig.wordpress.com/2016/04/27/solidos-cristalinos-y-amorfos/)

2.2.1 Propiedades fisicoquímicas. Dentro de las propiedades fisicoquímicas que pueden ser medidas en las preformas fabricadas con PET en estado amorfo, se presentan cuatro destacables que para el presente proyecto aportan la información necesaria para evaluar la dosificación de peletizado actual y a nivel industrial.

²⁵ REYES, Martín y RIVERA, Moisés. Estructura de sólidos amorfos. En: Ingenierías. octubre-diciembre 2000. vol. 2.no 9. p. 7.

²⁶ LAZA, J.M., y RUIZ, L. Estado amorfo. Transición vítrea. [En línea], 2014 [Consultado el 30-11-2019]. Disponible de internet:
[<https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/8680/mod_resource/content/1/Tema_3._Estado_amorfo._Transicion_vitrea.pdf>](https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/8680/mod_resource/content/1/Tema_3._Estado_amorfo._Transicion_vitrea.pdf)

2.2.1.1 Viscosidad intrínseca. Es una de las características más importantes del PET; “depende de la longitud de sus cadenas poliméricas, cuanto más largas sean las cadenas, más rígido será el material y, por tanto, mayor será la viscosidad”²⁷. Según Almazan²⁸, es una medida indirecta del peso molecular del polímero o del grado de polimerización y es de suma importancia al momento de moldear el plástico debido a que un valor suficientemente bajo repercute directamente en la fortaleza de material. Por tanto, “el aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento del peso molecular”²⁹.

Para el proceso de producción de preformas debe tenerse en cuenta “la resina PET es altamente higroscópica y puede contener alrededor del 0.4% de su peso en humedad (4000 ppm); para evitar que el agua hidrolice las cadenas poliméricas y con esto la viscosidad intrínseca disminuya, el material deberá contener 40ppm de agua como máximo. Es necesario que antes de ingresar a la máquina inyectora, la resina experimente un proceso de secado”³⁰.

La importancia del secado de la resina radica en que “la resistencia de la pared del envase está relacionada con la cantidad de moléculas del polímero, si la viscosidad disminuye drásticamente, se promueve la cristalización en el proceso de inyección y de soplado”³¹. De manera que, la viscosidad intrínseca (VI) es a su vez una medida directa de la eficiencia del secado, en donde una caída de este índice evidencia un secado deficiente y como resultado preformas de baja resistencia y cristalizadas. Sin embargo, ésta no es la única variable de proceso que afecta esta propiedad, ya que al aumentar el uso de material reciclado mecánicamente éste genera una disminución de VI. En síntesis, cuando se presenta una caída de viscosidad intrínseca a su vez habrá una reducción directa en las propiedades mecánicas de la botella (flexión, torsión, elasticidad, etc.).

Finalmente, ésta se utiliza para asignar un valor de viscosidad relativa a los diversos grados y aplicaciones de PET, que se enlistan en la figura 8.

²⁷ MÉNDEZ, Adrián. Parámetros clave a considerar durante el procesamiento del PET. [En línea], 1, marzo, 2017 [Consultado el 3-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/parmetros-clave-a-considerar-durante-el-procesamiento-del-pet>>

²⁸ ALMAZAN. Op. cit., p.16.

²⁹ ALMAZAN. Op. cit., p.12.

³⁰ ALMAZAN. Op. cit., p.27.

³¹ ALMAZAN. Op. cit., p.27.

Figura 8. Rangos de viscosidad intrínseca de diferentes grados de PET

| Tipo de PET | Viscosidad Intrínseca (dl/g) |
|----------------------------------------------------|------------------------------|
| • Grado Textil | 0.40 - 0.70 |
| • Grado película (película orientada biaxialmente) | 0.60 - 0.70 |
| • Botella para agua | 0.70 - 0.78 |
| • Grado bebida gaseosa | 0.78 - 0.85 |
| • Grado película o lámina (para termoformado) | 0.70 - 1.00 |
| • Grado técnico y cable para neumático | 0.72 - 0.98 |
| • Grado Monofilamento e ingeniería | 1.00 - 2.00 |

Fuente: PLASTICS TECHNOLOGY. Y la viscosidad, ¿qué papel juega cuando se procesa el PET? [En línea], 2017 [Consultado el 13-11-2019]. Disponible de internet: <<https://www.ptmexico.com/articulos/y-la-viscosidad-que-papel-juega-cuando-se-procesa-el-pet->>

2.2.1.2 Concentración de acetaldehído. El proceso de producción de PET trae consigo la conservación de cantidades residuales de acetaldehído (AA) dentro de la estructura del polímero, el cual es una impureza que debe mantenerse en niveles mínimos para no afectar el sabor del producto final que va a ser envasado. “Esta sustancia se incorpora al líquido que la contiene, en el caso de las bebidas el productor de las botellas debe cuidar la calidad del PET que se usa para su elaboración. Esta es la razón principal de que una bebida contenida en una botella de PET y la misma contenida en vidrio se perciban con diferente sabor”³².

Según Méndez³³, durante la etapa de polimerización en estado fundido se produce una resina PET amorfa con VI relativamente baja de 0.60 dL/g, que posee una gran cantidad de AA, pudiendo llegar a contener más de 20 ppm de AA. Para reducir la cantidad de subproductos de degradación y preparar la resina de PET para la segunda etapa de polimerización, la resina amorfa se seca y cristaliza posteriormente.

³² ALMAZAN. Op. cit., p.16.

³³ MÉNDEZ, Adrián. Cómo participa la formación de acetaldehído en el proceso del PET. [En línea], 1, marzo, 2018 [Consultado el 15-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.ptmexico.com/art%C3%ADculos/c%C3%B3mo-participa-la-formaci%C3%B3n-de-acetaldeh%C3%ADdo-en-el-procesamiento-del-pet>>

Químicamente,

El acetaldehído (CH_3CHO) es un compuesto químico orgánico que posee un fuerte olor afrutado. Las concentraciones típicas de acetaldehído en los envases de PET utilizados para el envasado de bebidas deben ser menos de 10 ppm, y probablemente, de 4 a 5 ppm. Se sabe que la presencia de esta sustancia dentro los envases de PET produce efectos adversos; con un punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente, AA puede difundirse fuera del PET y hacia la atmósfera o hacia el contenido envasado³⁴.

Por tanto, el acetaldehído es un subproducto de la degradación del PET generado durante la fusión del polímero en el moldeo por inyección de la preforma, a altas temperaturas y durante períodos prolongados de fusión, debido al reflujo de resina³⁵, el cual después de enfriarse queda atrapado en la pared de la preforma de PET y migra al producto después del llenado y almacenamiento³⁶.

Se consideran dos mecanismos de formación de AA debido a la degradación térmica del PET (véase figura 10 y literal 2.2.3.). En primer lugar, se tiene la descomposición térmica del grupo terminal hidroxiétilo presentada en la figura 9 y, en segundo lugar, aquella degradación que ocurre por escisión aleatoria de la cadena molecular del PET con la ruptura de los enlaces éster. Estas cadenas de degradación se forman con ácidos y grupos terminales de vinilo que pueden reaccionar de varias maneras, eliminando AA.³⁷

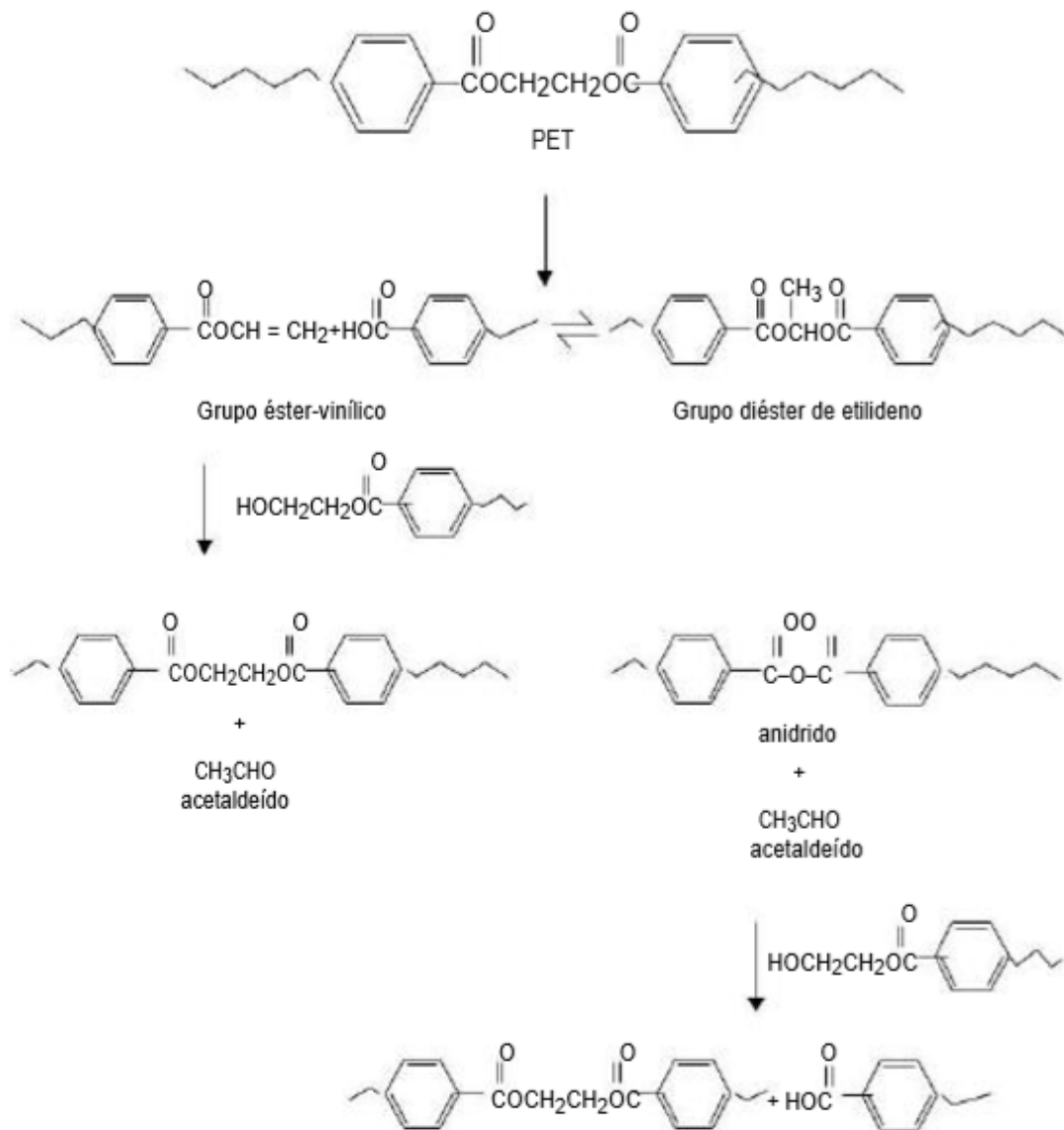
³⁴ *Ibíd.*

³⁵ MONTEIRO, Carlos, *et al.* *Fuzzy Method for in Control Acetaldehyde Generation in Resin PET in the Process of Packaging Pre-Forms of Plastic Injection.* *En: International Journal of Advanced Engineering Research and Science (UAERS).* Agosto, 2018. Vol. 5, no. 8, p. 240. DOI: 10.22161/ijaers.5.8.29

³⁶ EWENDER, Johann & WELLE, Frank. *Determination of the Migration of Acetaldehyde from PET Bottles into Non-carbonated and Carbonates Mineral Water.* [En línea], noviembre, 2008 [Consultado el 15-12-2019]. Disponible de internet: <
https://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/en/documents/Forschungsfelder/Produktsicherheit-und-analytik/Determination_of_the_Migration_of_Acetaldehyde.pdf>

³⁷ MONTEIRO. *Op. cit.*, p. 240.

Figura 10. Mecanismo de degradación térmica del PET



Fuente: MONTEIRO, Carlos, et al. *Fuzzy Method for in Control Acetaldehyde Generation in Resin PET in the Process of Packaging Pre-Forms of Plastic Injection*. En: *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* (UAERS). Agosto, 2018. Vol. 5, no. 8, p. 240. DOI: 10.22161/ijaers.5.8.29

2.2.1.3 Densidad. Es una medida del grado de cristalinidad de las fibras, “ya que las distancias intermoleculares en las zonas cristalinas son más pequeñas que en las amorfas. Por lo tanto, conociendo la densidad se puede tener una idea de su cristalinidad”⁴². Según Miller y Willis⁴³, la densidad de las fibras de PET en estado amorfo es de máximo 1.42 g/cm³. Además, “la densidad de un polímero cristalino es mayor que la de un polímero amorfo del mismo material y peso molecular, debido a que las cadenas de la estructura cristalina están más empacadas”⁴⁴.

La cristalinidad en los polímeros hace referencia a la ordenación de moléculas, y su grado es equivalente a la fracción del polímero que presenta estructura cristalina en relación al polímero total. El grado de cristalización depende de dos factores: “la flexibilidad referida a la habilidad de las moléculas para reordenarse y construir el cristal (linealidad). La regularidad o tacticidad permite construir el bloque repetitivo para formar el cristal”⁴⁵. Según Torres⁴⁶, este parámetro permite determinar la rigidez y el punto límite de los plásticos cristalinos. Sin embargo, el grado de cristalinidad de la resina no influye en los procesos posteriores de su aplicación, en la calidad de las botellas. La importancia de este parámetro incide entonces en el ahorro energético; una resina con menos cristalinidad funde más rápido, por lo que se requiere menos energía para dicho proceso.

La densidad es inversamente proporcional con la viscosidad intrínseca debido a que “la determinación de peso molecular es conveniente gracias a su influencia sobre las propiedades físicas de los materiales tales como la velocidad de cristalización (cristalinidad) y la viscosidad; la velocidad de cristalización disminuye al aumentar el peso molecular”⁴⁷.

Al hacer referencia a la cantidad de plástico en estado fluido existente por unidad de volumen y según Guerrero⁴⁸, es una propiedad que en la industria de los plásticos es muy importante para contar un proceso estable que permita obtener el

⁴² Puente, Publio. Determinación de la densidad de la fibra poliéster por el método “columna gradiente de densidades”. En: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (Sección Textil). s.f. p. 3.

⁴³ MILLER, R.G.J. and WILLIS, H.A. *Journal of Polymer Science*. 1956. vol.10. p. 401. [En línea], 2019 [Consultado el 2-12-2019]. Disponible de internet: <<http://www.mircan1979.com/es/marques/dynisco/>>

⁴⁴ TORRES, Angélica. Diseño del procedimiento para la realización de ensayos en el laboratorio de una industria productora de resina PET reciclado. Trabajo de grado Licenciado en Ingeniería Química. San José: Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería, 2013. p. 29.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 29.

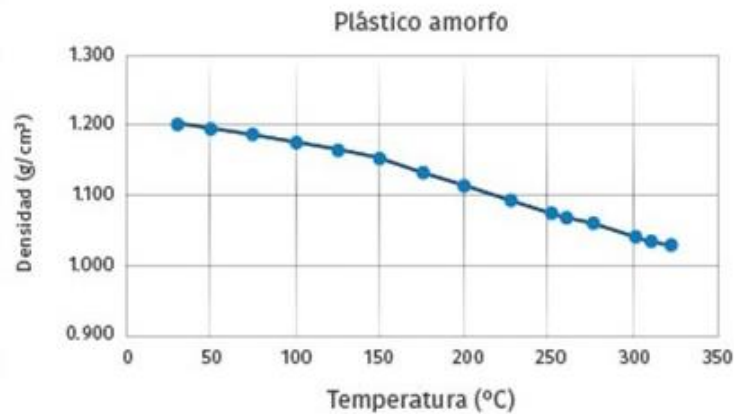
⁴⁶ *Ibíd.*, p. 29.

⁴⁷ MÉNDEZ, Adrián. Parámetros clave a considerar durante el procesamiento del PET. Op. cit.

⁴⁸ HERRERA, Adán. Densidad y posición de transferencia, dos conceptos claves en moldeo por inyección. [En línea]10, abril, 2016 [Consultado el 13-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/densidad-y-posicin-de-transferencia-dos-conceptos-clave-en-moldeo-por-inyeccin>>

producto que reúna las características de calidad para las cuales fue diseñado. En la figura 11 se puede observar el comportamiento de los plásticos amorfos con respecto a la temperatura, en donde se evidencia que el material sufre una disminución en su densidad aun cuando ya se encuentra en estado fluido, indicando que se tendrá un incremento en el volumen del material que se tendrá en el cilindro de inyección.

Figura 11. Cambio de densidad de plástico amorfo.



Fuente: HERRERA, Adán. Densidad y posición de transferencia, dos conceptos claves en moldeo por inyección. [En línea]10, abril, 2016 [Consultado el 13-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/densidad-y-posicin-de-transferencia-dos-conceptos-clave-en-moldeo-por-inyeccin>>

2.2.1.4 Índice de fluidez. Es una medida de las características de flujo de un polímero bajo condiciones específicas. Según Esparza⁴⁹, se define como la cantidad en gramos que fluye a través de un dado capilar (de 8.00 mm de longitud y radio de 1.05 mm) en un tiempo de 10 minutos bajo condiciones estándar de temperatura y presión. El índice de fluidez (MFI) es inversamente proporcional al peso molecular, que a su vez se relaciona con la viscosidad intrínseca. A pesar de ser un parámetro definido empíricamente, es útil para diferenciar varios grados de un mismo polímero, y su medidor puede considerarse como viscosímetro (reómetro) capilar que opera a presión (fuerza) constante.

⁴⁹ ESPARZA, María. Evaluación del Efecto de Parámetros de Proceso sobre las Propiedades de Piezas de PET y PBT Moldeadas por Inyección. Trabajo de Grado Maestría en Tecnología de Polímeros. Saltillo: Centro de Investigación en Química Aplicada, 2005. p. 57.

2.2.2 Propiedades mecánicas. Dentro de las propiedades mecánicas de las botellas fabricadas con PET en estado amorfo, se presentan dos relevantes que hacen parte del control de calidad de la empresa y que para el estudio son parámetros de evaluación de la dosificación de peletizado actual y a nivel industrial.

2.2.2.1 Resistencia a la compresión vertical de botellas PET. Se define como el máximo esfuerzo que el envase de plástico puede resistir bajo compresión vertical. Así mismo, su medición permite determinar la resistencia del material antes de presentar una deformación ante un esfuerzo de compresión⁵⁰. Su utilidad radica en ser la característica más importante en el proceso de embalaje, debido a que “sirve para evaluar la carga máxima que puede soportar un envase durante su apilado y transporte”⁵¹.

2.2.2.2 Resistencia a la presión interna de botellas PET. Es un ensayo en donde se testean las botellas mediante la aplicación de presión al agua contenida en el envase, durante un tiempo establecido o hasta que se presente la rotura del envase, caso en el que el resultado se denomina falla. “Este parámetro es útil en aquellos envases expuestos a una presión interna alta, como son bebidas carbonatadas o líquidos que aumentan su volumen en función de la temperatura, como por ejemplo los aceites”⁵².

2.2.3 Degradación térmica. Se entiende por degradación como “cualquier cambio no deseado en las propiedades, ocurrido luego de que el material ha sido puesto en servicio. En la degradación de polímeros, se refiere a procesos irreversibles que se producen y provocan la modificación de la estructura química y las propiedades físicas del polímero.”⁵³ El PET sufre diversos tipos de degradaciones, según las condiciones a las que se exponga, una de ellas es la degradación térmica en donde el material pierde la estabilidad.

En la degradación térmica, “los enlaces del material se rompen por acción de la temperatura. La facilidad con la cual un polímero se degrada depende principalmente de la magnitud de energía de los enlaces presentes en la molécula. La molécula de PET, compuesta principalmente por enlaces C-H requiere menor

⁵⁰ TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Propiedades mecánicas. [En línea], 25, junio, 2011 [Consultado el 12-12-2019]. Disponible de internet: <<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-mecanicas.html>>

⁵¹ AINIA y AIMPLAS. La correcta especificación de los envases. [En línea], 2016 p.23. [Consultado el 12-12-2019] Disponible de internet: <https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos_publicaciones_empresas/la-correcta-especificacion-de-los-envases.pdf>

⁵² *Ibíd.*, p.23.

⁵³ TORRES, Op. cit. p. 4.

energía para su rotura, en comparación con otros enlaces”⁵⁴. Según Posada⁵⁵, si la temperatura se eleva demasiado las moléculas se descomponen en fragmentos pequeños (radicales libre, iones libres, H₂, CO, etc.). Esto se debe a que las uniones son covalentes y tienen una resistencia limitada, que es vencida por el calor.

Hay dos tipos de transiciones que se observan comúnmente al calentar o enfriar un plástico:

La transición es de primer orden cuando las propiedades del material cambian abruptamente y la transición de segundo orden es más gradual y usualmente se puede relacionar con los segmentos amorfos de polímero. Además de la ocurrencia de las transiciones, las propiedades de un plástico cambian continuamente con la temperatura. La vibración de los segmentos de la cadena aumenta con la temperatura y este movimiento debilita las fuerzas cohesivas entre las moléculas, generando el ablandamiento del material y afectando otras propiedades físicas, óptimas, mecánicas y eléctricas⁵⁶.

Finalmente, según Torres⁵⁷ en este tipo de degradación se forman grupos carboxílicos terminales que se evidencia con la producción de compuestos, lo cual conlleva a una disminución en el peso molecular y por consiguiente en el valor de viscosidad intrínseca. Así mismo, se produce una generación de acetaldehído. Cabe mencionar que “la degradación térmica ocurre cuando el polímero, a temperaturas elevadas, empieza a experimentar cambios químicos sin el concurso de otras sustancias químicas”⁵⁸.

2.2.4 Degradación hidrolítica. En este tipo de degradación “el PET reacciona con el agua a elevadas temperaturas provocando reducción en el peso molecular”⁵⁹, es decir, se verá reflejado en una disminución de viscosidad intrínseca. La reacción general del proceso es:



⁵⁴ TORRES, Op. cit. p. 6.

⁵⁵ POSADA, Beatriz. La degradación de los plásticos. En: Revista Universidad EAFIT. s.f. no. 94. p. 72.

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 72.

⁵⁷ TORRES. Op. cit. p. 6.

⁵⁸ POSADA. Op. cit. p. 72.

⁵⁹ IBERPLAST S.A.S. GUÍA DE DEFECTOS EN INYECCIÓN. 2019.

3. CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DE PET EN ESTADO AMORFO OBTENIDO DE EXCEDENTES INDUSTRIALES

Con el fin de tener conocimiento técnico acerca de la materia prima en estudio del presente proyecto y la influencia de sus propiedades fisicoquímicas, las cuales permiten escoger los parámetros de la máquina inyectora para la fabricación de preformas, en este capítulo se presentan los resultados de las mediciones de viscosidad intrínseca, concentración de acetaldehído, densidad e índice de fluidez en 10 muestras de PET en estado amorfo.

El muestreo se llevó a cabo tomando las muestras de la parte superficial de los cinco *big-bags* producidos en la semana de la realización del ensayo de laboratorio, los cuales no presentan contaminantes de otros materiales debido a la clasificación previa al proceso de reciclaje que desarrolla la empresa, haciendo que las muestras fuesen homogéneas y no generaran afectación al muestreo.

3.1 ELABORACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Se llevaron a cabo las distintas mediciones de las propiedades fisicoquímicas del PET en estado amorfo en las instalaciones de la empresa. Los procedimientos y resultados obtenidos se presentan a continuación

3.1.1 Medición de viscosidad intrínseca, densidad e índice de fluidez. El ensayo de laboratorio se llevó a cabo según lo descrito en el procedimiento de Pruebas y Ensayos interno de la empresa PE11102⁶⁰, con 10 muestras y se obtuvieron los resultados enunciados en la tabla 1.

⁶⁰ IBERPLAST S.A.S. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA EN PET. 2019. PE 11102.

Figura 12. Gránulos de PET en estado amorfo



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Preparación muestras PET en estado amorfo



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Indexador de fusión Dynisco® LMI4000



Fuente: MIRCAN. Viscosensor. [En línea], 2019
Disponible de internet:
<<http://www.mircan1979.com/es/marques/dynisco/>>

Tabla 1. VI, densidad y MFR de PET en estado amorfo.

| Muestra | VI (dL/g) | Densidad (g/cm³) | MFR (g/10 minutos) |
|-----------------|------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.535 | 1.517 | 130.2 |
| 2 | 0.544 | 1.549 | 122.1 |
| 3 | 0.532 | 1.515 | 144.0 |
| 4 | 0.540 | 1.560 | 125.2 |
| 5 | 0.533 | 1.529 | 132.4 |
| 6 | 0.532 | 1.520 | 135.3 |
| 7 | 0.543 | 1.541 | 123.2 |
| 8 | 0.536 | 1.522 | 125.2 |
| 9 | 0.540 | 1.526 | 123.4 |
| 10 | 0.541 | 1.525 | 128.2 |
| Promedio | 0.538 | 1.530 | 128.9 |

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Medición de concentración de acetaldehído. Siguiendo la ASTM F2013-10⁶¹, inicialmente las 10 muestras de resina se prefragilizaron, es decir, se sumergieron en nitrógeno líquido (que se encuentra a -195°C aproximadamente), para evitar la degradación térmica del material. Acto seguido, se pulverizaron las muestras de resina en un molino centrífugo Restch ZM200, mostrado en la figura 15, especial para un tamaño de grano inferior a 10mm y con una granulometría final menor a 40 µm, durante 10 segundos. Se procedió a pesar la muestra pulverizada y limpiar el equipo con aire a presión y brocha.⁶²

Luego, las muestras pulverizadas se pesaron en viales, los cuales se sellaron manualmente con septas y se ilustran en la figura 16.

Por último, las muestras se ingresaron al cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus® 580 con detector de ionización de llama (FDI), con una columna capilar Elite Q PLOT 30 m 0.53 m x 20 µm y Headspace Perkin Elmer Turbomatrix 40, el cual trabaja a 250°C y se visualiza en la figura 17; los viales subieron al horno del equipo cada 8 minutos, y durante 60 minutos se realizó la termostatación de cada uno a 150°C. Al finalizar la secuencia, las temperaturas del cromatógrafo y Headspace se regularon según el método de apagado.⁶³

Los resultados obtenidos correspondientes a las ppm se enuncian en la tabla 2. Esta concentración se calculó según el área bajo la curva de los cromatogramas de las 10 muestras, de los cuales se adjunta uno en el anexo A.

⁶¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Determination of Residual Acetaldehyde in Polyethylene Terephthalate Bottle Polymer Using an Automated Static Head-Space Sampling Device and a Capillary GC with a Flame Ionization Detector*. 2016. ASTM F2013-10.

⁶² IBERPLAST S.A.S. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL MOLINO CENTRÍFUGO RETSCH ZM200. 2019. NO 11064.

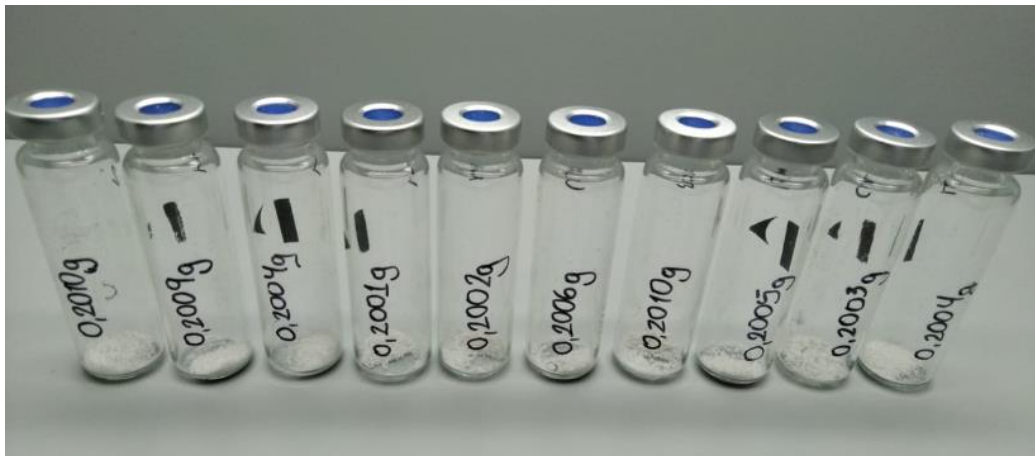
⁶³ IBERPLAST S.A.S. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL CROMATÓGRAFO DE GASES CLARUS 580 Y HEADSPACE TURBOMATRIX 40. 2019. NO 11063.

Figura 15. Molino centrífugo Restch ZM200



Fuente: RETSCH. Molino Ultracentrífugo ZM200. [En línea], 2019. Disponible de internet: <https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-rotor/zm-200/funcionamiento-caracteristicas/>

Figura 16. Preparación de muestras de PET en estado amorfo en viales.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus® 580



Fuente: DIRECTINDUSTRY. Cromatógrafo de gases. [En línea], 2019 [Consultado el 21-12-2019]. Disponible de internet: <https://img.directindustry.es/images_di/photo-g/14711-13240375.jpg>

Tabla 2. Concentración de acetaldehído de PET en estado amorfo.

| Muestra | Concentración AA (ppm) |
|-----------------|-------------------------------|
| 1 | 3.903 |
| 2 | 3.788 |
| 3 | 3.610 |
| 4 | 3.720 |
| 5 | 3.910 |
| 6 | 3.972 |
| 7 | 3.899 |
| 8 | 4.008 |
| 9 | 4.346 |
| 10 | 4.575 |
| Promedio | 3.973 |

Fuente: elaboración propia.

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El rango promedio de la viscosidad intrínseca del PET en estado amorfo, que se transforma de los excedentes industriales, es de 0.55 a 0.65 dL/g lo cual representa

un bajo peso molecular. La variación del valor depende de cuán completo se haya realizado el secado de los gránulos del PET⁶⁴. Con base a lo anterior y dado el cumplimiento del intervalo mencionado de los resultados de VI de la tabla 1, los valores obtenidos se encuentran en un rango de 0.532 – 0.544 dL/g para el PET en estado amorfo no retornable usado en la empresa.

Las concentraciones típicas de acetaldehído en los envases de PET utilizados para bebidas carbonatas deben ser de menos de 10ppm, y para envases de agua entre 4 a 5 ppm⁶⁵. Tomando en cuenta los resultados enunciados de concentración de AA de la tabla 2, que cumplen lo especificado en la literatura, se obtuvieron valores entre 3.61 – 4.58 ppm para el PET en estado amorfo no retornable utilizado en la empresa.

Según Miller y Willis⁶⁶ la densidad de las fibras de PET en estado amorfo es de máximo 1.42 g/cm³. Los resultados obtenidos del PET analizado se encuentran en un rango de 1.515 – 1.560 g/cm³, siendo mayor a lo reportado en la literatura la cual hace referencia a material virgen. Mientras que, los valores experimentales provienen de material que ya ha sido procesado.

Se graficaron los resultados de VI versus densidad para las 10 muestras (véase gráfica 1), evidenciando el cumplimiento de su relación inversa; “la resistencia de la pared del envase está relacionada con la cantidad de moléculas de polímero, si la viscosidad intrínseca disminuye drásticamente, se promueve la cristalización en el proceso de inyección y soplado”⁶⁷.

De manera que, al ser la densidad una medida del grado de cristalización, que a su vez representa la flexibilidad (entendida como la habilidad de las moléculas para reordenarse y construir el cristal) y la regularidad de las cadenas (o tacticidad que permite la construcción del bloque repetitivo para formar el cristal)⁶⁸, ésta se relaciona inversamente con la viscosidad intrínseca ya que “la determinación de peso molecular es conveniente gracias a su influencia sobre las propiedades físicas de los materiales tales como la velocidad de cristalización (cristalinidad); la velocidad de cristalización disminuye al aumentar el peso molecular”⁶⁹.

⁶⁴ TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Op. cit.

⁶⁵ MÉNDEZ, Adrián. Cómo participa la formación de acetaldehído en el proceso del PET. Op. cit.

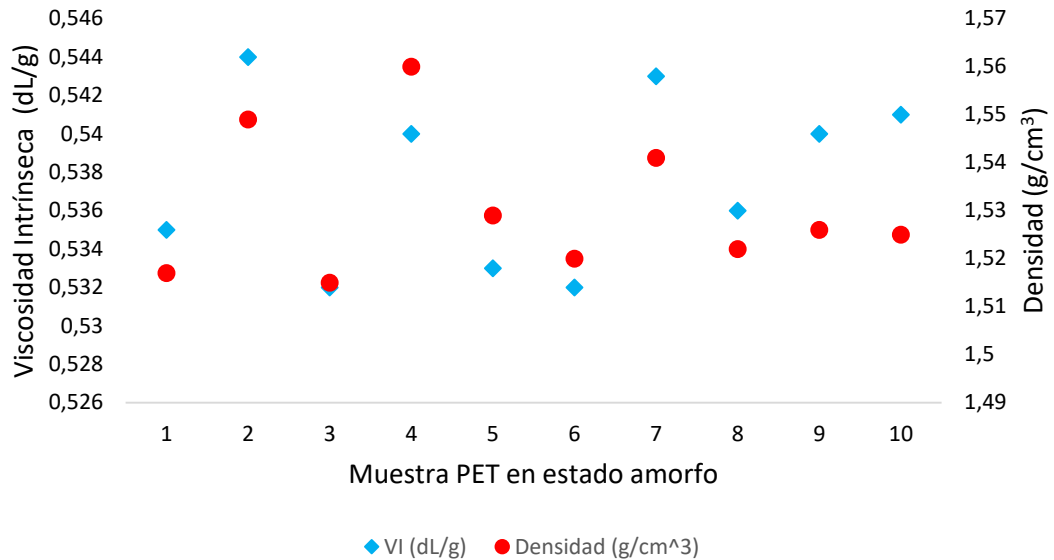
⁶⁶ MILLER. Op. cit.

⁶⁷ ALMAZAN. Op. cit. p. 27.

⁶⁸ TORRES. Op. cit. p. 29.

⁶⁹ MÉNDEZ, Adrián. Parámetros clave a considerar durante el procesamiento del PET. Op. cit.

Gráfica 1. Viscosidad Intrínseca vs. Densidad



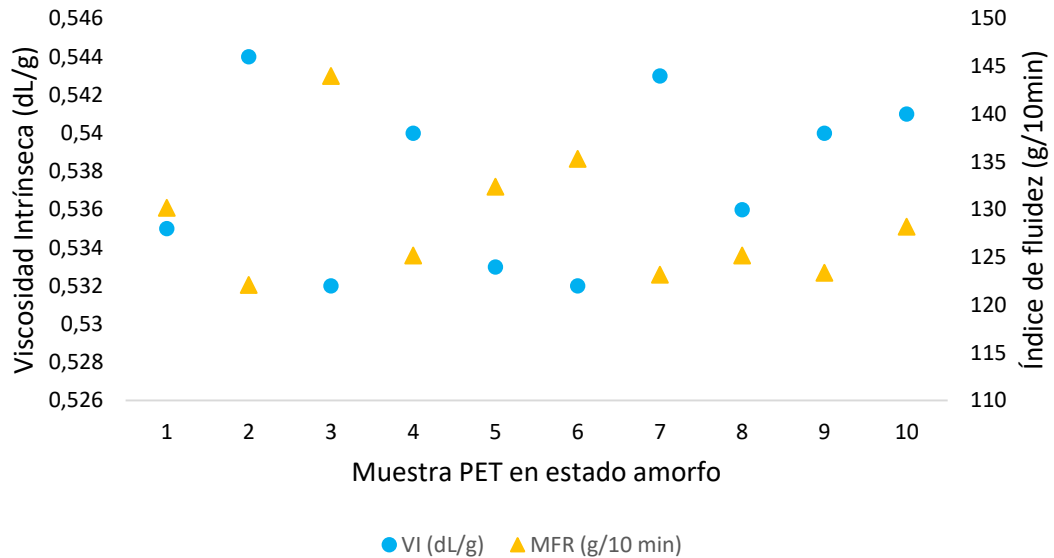
Fuente: elaboración propia.

Los resultados presentados en la tabla 1 del índice de fluidez dan cumplimiento a la relación inversa que posee esta característica de flujo con el peso molecular, que a su vez se relaciona con la viscosidad intrínseca⁷⁰ y que se visualiza en la gráfica 2. No se encontraron reportados datos en la literatura de MFR de PET en estado amorfo, dado que es una materia prima que depende del reciclaje mecánico interno que realiza la empresa. Razón por la que los datos experimentales hallados se asumen válidos, los cuales están en un rango de 122 a 144 g/10min.

Según los intervalos de los datos analizados anteriormente, la tolerancia de cada rango de las propiedades fisicoquímicas medidas se duplicó, dado que la procedencia de los excedentes industriales es de diferentes máquinas y, por lo tanto, procesos. Adicionalmente, el número de reciclajes mecánicos por el cual pasa el PET tiene relación directa con las propiedades del material, esperando que tengan una variación en sus resultados, a medida que éste se reprocese. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, debido a la degradación térmica y mecánica, se esperaría que la VI disminuya y la concentración de AA aumente. Los resultados se presentan en la tabla 3.

⁷⁰ ESPARZA. Op. cit. p. 57.

Gráfica 2. Viscosidad Intrínseca vs. Índice de Fluidez



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Rango de propiedades fisicoquímicas de PET en estado amorfo

| PET en estado amorfo – Iberplast S.A.S. | | | |
|-----------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------|
| VI (dL/g) | Concentración AA (ppm) | Densidad (g/cm ³) | MFR (g/10 min) |
| 0.538 +/-0.024 | 4.00 +/-2.00 | 1.53 +/-0.05 | 129 +/-22 |

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se logró caracterizar el PET en estado amorfo a través de la medición de las propiedades fisicoquímicas viscosidad intrínseca, densidad, índice de fluidez y concentración de acetaldehído, estableciendo los rangos de sus valores a través de promedio y duplicando la tolerancia de cada uno.

4. DIAGNÓSTICO DE PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE PREFORMAS Y BOTELLAS NO RETORNABLES FABRICADAS CON LA DOSIFICACIÓN ACTUAL DE PET AMORFO

Con el fin de tener un punto de partida para una posterior comparación de resultados respecto a las dosificaciones de PET en estado amorfo a evaluar industrialmente, se realizó el diagnóstico de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las preformas y botellas no retornables para bebidas con 3% de PET en estado amorfo, lo cual corresponde a la dosificación actual que Iberplast S.A.S. tiene en su proceso de producción.

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones realizadas en 10 preformas y 10 botellas no retornables para bebidas con la dosificación actual de peletizado, y el análisis de los valores obtenidos de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del diagnóstico realizado. Las muestras de preforma evaluadas corresponden a las 5 cavidades del molde consideradas críticas (véase anexo B), debido a que son las primeras en ser inyectadas por distribución de la máquina, con diferencia de milésimas de segundos entre las demás cavidades, soportando durante dicho tiempo la alta temperatura del molde y, por tanto, generando variaciones en sus propiedades fisicoquímicas consideradas condiciones críticas. Mientras que, las muestras de botellas analizadas fueron sopladas en los 5 moldes habilitados por la empresa. Cabe resaltar que, el muestreo de preformas y botellas fue por duplicado.

4.1 PREFORMA

Se llevaron a cabo las mediciones de viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído, debido a que son variables críticas para el proceso de soplado y el desempeño de la botella al momento de contener la bebida carbonatada.

Las muestras analizadas correspondieron a preformas de referencia 50g de peso con 3% de PET en estado amorfo. Los procedimientos y resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.1.1 Medición de viscosidad intrínseca. El ensayo de laboratorio se llevó a cabo según lo descrito en el procedimiento interno de la empresa para la determinación de la viscosidad intrínseca en PET⁷¹, con 10 muestras y se obtuvieron los resultados enunciados en la tabla 4.

⁷¹ IBERPLAST S.A.S. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA EN PET. Op. cit.

Tabla 4. VI de preforma con 3% de PET en estado amorfo.

| Muestra | VI (dL/g) |
|-----------------|------------------|
| 1 | 0.818 |
| 2 | 0.836 |
| 3 | 0.840 |
| 4 | 0.837 |
| 5 | 0.825 |
| 6 | 0.844 |
| 7 | 0.825 |
| 8 | 0.822 |
| 9 | 0.829 |
| 10 | 0.814 |
| Promedio | 0.829 |

Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Medición de concentración de acetaldehído. El procedimiento inició con el restante de la muestra molida proveniente de la preparación de VI de la preforma. Luego se prefragilizó y se pulverizó en un molino centrífugo Restch ZM200, especial para un tamaño de grano inferior a 10mm y con una granulometría final menor a 40 μm , durante 10 segundos. Se procedió a pesar en viales, los cuales se sellaron manualmente con septas.

Por último, las muestras se ingresaron al cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus® 580 con detector de ionización de llama (FDI), con una columna capilar Elite Q PLOT 30 m 0.53 m x 20 μm y Headspace Perkin Elmer Turbomatrix 40, el cual trabaja a 250°C y se visualiza en la figura 17; los viales subieron al horno del equipo cada 8 minutos, y durante 60 minutos se realizó la termostatación de cada uno a 150°C. Al finalizar la secuencia, las temperaturas del cromatógrafo y Headspace se regularon según el método de apagado.⁷²

Los resultados obtenidos correspondientes a las ppm se enuncian en la tabla 5. Esta concentración se calculó según el área bajo la curva de los cromatogramas de las 10 muestras, de los cuales se adjunta uno en el anexo C.

⁷² IBERPLAST S.A.S. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL CROMATÓGRAFO DE GASES CLARUS 580 Y HEADSPACE TURBOMATRIX 40. Op. cit.

Tabla 5. Concentración de AA de preforma con 3% de PET en estado amorfo.

| Muestra | Concentración AA (ppm) |
|-----------------|-------------------------------|
| 1 | 2.21 |
| 2 | 2.56 |
| 3 | 2.71 |
| 4 | 2.52 |
| 5 | 1.71 |
| 6 | 1.83 |
| 7 | 2.41 |
| 8 | 1.94 |
| 9 | 2.69 |
| 10 | 2.93 |
| Promedio | 2.35 |

Fuente: elaboración propia.

4.2 BOTELLA NO RETORNABLE PARA BEBIDAS

Se llevaron a cabo las mediciones de resistencia a la compresión vertical y a la presión interna, puesto que son las pruebas estandarizadas en la ruta de control de calidad de soplado en la empresa.

Las muestras evaluadas correspondieron a botellas de referencia 2L, fabricadas con preforma de 50g, con una dosificación de 3% de PET en estado amorfo. Los procedimientos y resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.2.1 Medición de resistencia a la compresión vertical. La prueba se realizó cumpliendo lo estipulado en el procedimiento interno de Iberplast de medición de la resistencia a la carga vertical para botellas de PET⁷³, según la ASTM D695, en donde inicialmente se identificó el rango de valores que debe cumplir según la referencia de la botella no retornable para bebidas carbonatadas y luego, se ubicó dejando un espacio de 1.0 cm entre la boca de la botella y la parte inferior del pistón sobre la base incluida en el equipo para ensayos universales Instron® (véase figura 18), el cual actúa aplicando una carga de 240 kg-f a las muestras analizadas, y reporta los resultados en el programa de muestreo, control y análisis de datos para el ensayo de materiales Series IX⁷⁴.

⁷³ IBERPLAST S.A.S. RESISTENCIA A LA CARGA VERTICAL PARA BOTELLAS DE PET. 2019. PE 11007.

⁷⁴ IBERPLAST S.A.S. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACION DEL EQUIPO PARA ENSAYOS UNIVERSALES INSTRON. 2019. NO 11000.

Se registraron los valores de carga proporcionados por el equipo al momento de registrarse la primera deformación y se obtuvo la curva de comportamiento, la cual se adjunta en el anexo D. Así mismo, en las figuras 19 y 20, se evidencia el estado de la botella antes y durante la prueba. Finalmente, los resultados obtenidos mostrados en la pantalla del equipo se registraron, y se presentan en la tabla 6.

Se debe tener en cuenta que, según las especificaciones internas de la empresa, las botellas plásticas PET de 2L “deben resistir una carga mayor o igual a 17 kg-F antes de sufrir la primera deformación”⁷⁵, hecho que se cumplió satisfactoriamente con las 10 botellas medidas.

Figura 18. Equipo para ensayos universales – Instron



Fuente: METALINSPEC. Instron – Equipos para Pruebas Mecánica de Materiales [En línea], 2019 [Consultado el 10-01-2020]. Disponible de internet:
<<https://www.metalinspec.com.mx/marcas/instron>>

⁷⁵ IBERPLAST S.A.S. FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO BOTELLA 2.0 LITROS GENÉRICA – PCO 1881 28 mm. 2014. PIB 11359.

Figura 19. Botella con 3% de peletizado en posición para iniciar prueba.



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Botella con 3% de peletizado deformada luego de recibir carga máxima.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resistencia a la compresión vertical de botella con 3% de PET en estado amorfo.

| Muestra | Resistencia (kg-F) |
|-----------------|---------------------------|
| 1 | 29.93 |
| 2 | 29.28 |
| 3 | 29.02 |
| 4 | 28.66 |
| 5 | 31.71 |
| 6 | 31 |
| 7 | 30.06 |
| 8 | 28.26 |
| 9 | 28.52 |
| 10 | 28.59 |
| Promedio | 29.503 |

Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Medición de resistencia a la presión interna La prueba de presión interna se llevó a cabo en el equipo Atrya BR-6000P, ilustrado en la figura 21, según procedimiento interno de la empresa para botella de PET⁷⁶. Su principio radica en aplicar una presión constante a un envase de plástico (botella) por un periodo conocido de tiempo; suministra la presión por aire comprimido que va de 50 a 300 psi (3.51 a 21 kg/cm²).⁷⁷

La botella a analizar se llenó con agua, se colocó en el lugar del equipo que sostiene el cuello de la misma y se selló mediante el ajuste de las abrazaderas de presión con un mínimo de fuerza, con el fin de evitar fugas de agua en la prueba. Tras ajustar el regulador de aire hasta que la presión del manómetro fuera de aproximadamente 10 psi (1kg/cm²), se comenzó la aplicación de la presión a la botella durante el tiempo que cada una requirió para llegar al valor de 135 psi (presión establecida para la prueba).⁷⁸ En las figuras 22 y 23 se presenta el estado de la botella durante la prueba.

En la figura 24 se visualiza la base de la botella después de la prueba sin ninguna fisura y/o rotura puesto que, al no pasar la prueba la botella se explotaría desde su punto de inyección u otras zonas. En la figura 25 se ilustra el estado de ésta sin

⁷⁶ IBERPLAST S.A.S. RESISTENCIA A LA PRESIÓN INTERNA PARA BOTELLAS DE PET. 2019. PE 11006.

⁷⁷ IBERPLAST S.A.S. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL MEDIDOR DE PRESIÓN. 2019. NO 11001.

⁷⁸ *Ibid.*

haberla sometido a presión y después de presurizarla, sin evidenciar cambios atributivos en la forma de la botella.

Se tuvo en cuenta que, “si la botella resiste a la presión aplicada durante el tiempo programado, en la pantalla del equipo aparecerá el mensaje ‘Pasa’. Si la botella tiene defectos, fisuras o está mal sellada contra la prensa, la presión no subirá a nivel de prueba, por tanto, el equipo reportará el mensaje de ‘Falla’ ”⁷⁹. El final de la prueba se dio al no presentar falla la botella, atribuyendo “OK” como resultado.

Los resultados obtenidos con las 10 botellas no retornables para bebidas se muestran en la tabla 7.

Figura 21. Equipo Atrya BR-6000P



Fuente: ATRYA. Manual de Operación y Servicio Probador de Resistencia a la Presión Interna. 2015.

⁷⁹ Ibid.

Figura 22. Inicio de prueba de resistencia a la presión interna de botella con 3% de peletizado.



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Botella con 3% de peletizado en proceso de llenado de agua.



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Base de botella con dosificación de 3% de peletizado, sin rotura ni fisura.



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Botella con 3% de PET en estado amorfo antes y después de la prueba.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resistencia a la presión interna de botella con 3% de PET en estado amorfo.

| Muestra | Resistencia |
|----------------|--------------------|
| 1 | OK |
| 2 | OK |
| 3 | OK |
| 4 | OK |
| 5 | OK |
| 6 | OK |
| 7 | OK |
| 8 | OK |
| 9 | OK |
| 10 | OK |

Fuente: elaboración propia.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras realizar las mediciones de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas en 10 botellas no retornables para bebidas con 3% de PET en estado amorfo, y teniendo en cuenta los resultados reportados en las tablas 4 a la 7, se determinaron los siguientes aspectos.

Inicialmente, con el VI obtenido de 0.830 ± 0.015 dL/g y concentración de AA de 2.32 ± 0.605 ppm, se evidenció el cumplimiento de las especificaciones establecidas en la ficha técnica interna de preforma para bebida carbonatada de 2L, en la cual se enuncia en las características específicas “viscosidad intrínseca entre $0.810 - 0.860$ dL/g y nivel bajo de acetaldehído”⁸⁰, es decir, valores menores a 10 ppm para bebidas carbonatas. Así mismo, según Méndez, García y Concepción⁸¹, los grados del PET se clasifican de acuerdo a los valores de VI, siendo para el grado envase dos rangos: $0.700 - 0.780$ dL/g grado envase para agua y $0.780 - 0.850$ dL/g grado bebidas carbonatas, confirmando así que la referencia de preforma se encuentra dentro de los estándares para el tipo de bebida analizada.

Con los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas, se comprobó su cumplimiento respecto a lo definido en la ficha técnica de la botella analizada; para el caso de la resistencia a la presión interna, no hubo explosión de ninguna botella al soportar una presión interna mínima de 135 psi durante 13 segundos y siendo un

⁸⁰ *Ibíd.*

⁸¹ MÉNDEZ, Adrián. Parámetros clave a considerar durante el procesamiento del PET. Op. cit.

parámetro que, según AINIA* y AIMPLAS**⁸², es útil en aquellos envases expuestos a una presión interna alta, como son bebidas carbonatadas.

Para la resistencia a la compresión vertical, antes de sufrir la primera deformación, las botellas soportaron una carga mayor o igual a 17 kg-F, la cual “ es fijada por convenio o por cliente y sirve para estimar la carga de apilado (en el embalaje, almacenamiento y transporte) que puede soportar el envase sin que se deforme”⁸³.

Finalmente, se lograron determinar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de preformas y botellas no retornables para bebidas carbonatadas, fabricadas con la dosificación actual de 3% Polietilentereftalato en estado amorfo, las cuales se encuentran dentro de los estándares según las especificaciones de Iberplast S.A.S. y la literatura.

⁸² AINIA y AIMPLAS. Op. cit. p. 23.

* Centro Tecnológico Agroalimentario de España

** Instituto Tecnológico del Plástico de España

⁸³ AINIA y AIMPLAS. Op. cit. p. 28 – 31.

5. ESTABLECIMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL DE INCREMENTO DE PET EN ESTADO AMORFO CON CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO EN LA EMPRESA

Con el fin de establecer el aumento en la dosificación de PET en estado amorfo a nivel industrial, que dé cumplimiento a las especificaciones técnicas de producto en Iberplast S.A.S., y teniendo en cuenta los resultados de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas medidas con la dosificación actual de PET en estado amorfo (3%), en este capítulo se presentan los resultados de los dos ensayos industriales variando la dosificación en 5% y 8% de PET en estado amorfo con resina virgen (véase figura 26), y sus respectivos rangos de VI, concentración de AA, resistencia a la compresión vertical y a la presión interna.

Las muestras de preforma evaluadas corresponden a las 5 cavidades del molde consideradas críticas (véase anexo B), debido a que son las primeras en ser inyectadas por distribución de la máquina, con diferencia de milésimas de segundos entre las demás cavidades, soportando durante dicho tiempo la alta temperatura del molde y, por tanto, generando variaciones en sus propiedades fisicoquímicas consideradas condiciones críticas. Mientras que, las 10 muestras de botellas analizadas fueron sopladas en los 5 moldes habilitados por la empresa. Cabe resaltar que, el muestro de preformas y botellas fue por duplicado.

Así mismo, el desarrollo experimental con un análisis comparativo estadístico de los resultados entre el 3%, 5% y 8% y con ello el establecimiento de la dosificación de PET en estado amorfo que cumpla los requisitos de la empresa.

Figura 26. Gránulos de PET virgen



Fuente: elaboración propia.

5.1 REALIZACIÓN DE DOS ENSAYOS INDUSTRIALES CON DOSIFICACIÓN DEL 5% Y 8% DE PET EN ESTADO AMORFO

Se llevaron a cabo las dos corridas industriales, con 5% y 8% respectivamente, en las instalaciones de la empresa, siguiendo los procesos presentados a continuación.

5.2 INYECCIÓN DE PREFORMA

En el proceso de inyección de preforma se emplearon las referencias disponibles por parte del departamento de planeación y producción: 40g de peso para la inyección con 5% de dosificación, y 50g de peso para la preforma con 8% de PET en estado amorfo. El procedimiento se realizó según lo descrito en el literal 1.3.2. y se presentan los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas medidas.

5.2.1 Inspección atributiva. Al inicio de la corrida industrial se realizaron varios muestreos de kits de preforma, correspondientes a un ciclo de inyección completo del molde, con el fin de verificar cualitativamente la preforma según la NI 11019: “Tomar el número de muestras consecutivas. Realizar inspección normal para defectos críticos y tomar las mismas muestras para defectos mayores y menores. Los defectos menores no ocasionan rechazo”⁸⁴. Cabe resaltar que, la toma de muestras a analizar se realizó cuando se estabilizó la producción al no observarse defectos en estas.

5.2.2 Medición de viscosidad intrínseca. Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo según lo descrito en el procedimiento interno de la empresa para la determinación de la viscosidad intrínseca en PET⁸⁵, siguiendo los pasos descritos en el literal 4.1.1. en 10 preformas; los resultados con 5% y 8% de PET en estado amorfo se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. VI de preforma con 5% y 8% de PET en estado amorfo.

| Muestra | VI (dL/g) | |
|---------|-----------|-------|
| | 5% | 8% |
| 1 | 0.844 | 0.819 |
| 2 | 0.818 | 0.815 |
| 3 | 0.809 | 0.813 |
| 4 | 0.814 | 0.810 |

⁸⁴ IBERPLAST S.A.S. PREFORMA NO RETORNABLE. 2019. NI 11019.

⁸⁵ IBERPLAST S.A.S. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA EN PET. Op. cit.

Tabla 8. (Continuación)

| VI (dL/g) | | |
|------------------|--------------|--------------|
| Muestra | 5% | 8% |
| 5 | 0.800 | 0.812 |
| 6 | 0.812 | 0.816 |
| 7 | 0.830 | 0.822 |
| 8 | 0.844 | 0.822 |
| 9 | 0.842 | 0.813 |
| 10 | 0.804 | 0.814 |
| Promedio | 0.822 | 0.816 |

Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Medición de concentración de acetaldehído Los procedimientos se realizaron según lo descrito en el literal 4.1.2. y los resultados obtenidos correspondientes a las ppm se enuncian en la tabla 9 para 5% y 8% de PET en estado amorfo. Estas concentraciones se calcularon según el área bajo la curva de los cromatogramas de las muestras, de los cuales se adjunta uno en el anexo E y F, respectivamente.

Tabla 9. Concentración de AA de preforma con 5 y 8% de dosificación de PET amorfo.

| Concentración AA (ppm) | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Muestra | 5% | 8% |
| 1 | 2.49 | 2.60 |
| 2 | 2.56 | 2.55 |
| 3 | 2.04 | 2.49 |
| 4 | 2.13 | 2.87 |
| 5 | 2.73 | 3.10 |
| 6 | 1.26 | 2.50 |
| 7 | 1.47 | 2.80 |
| 8 | 2.33 | 2.84 |
| 9 | 2.37 | 2.79 |
| 10 | 2.27 | 2.72 |
| Promedio | 2.16 | 2.73 |

Fuente: elaboración propia.

5.3 SOPLADO DE BOTELLA NO RETORNABLE PARA BEBIDAS

El proceso de soplado de botella no retornable para bebidas carbonatadas de referencia: 1.5L con 5% de dosificación y preforma de 40g, y 2L con 8% de PET en estado amorfo y preforma de 50g, se llevó a cabo según lo descrito en el literal 1.3.3.

5.3.1 Medición de resistencia a la compresión vertical. Las pruebas se realizaron cumpliendo lo estipulado en el procedimiento interno de Iberplast de medición de la resistencia a la carga vertical para botellas de PET⁸⁶, según la ASTM D695, descrito en el literal 4.2.1. Los resultados con 5% y 8% de PET en estado amorfo se presentan en la tabla 10, y las curvas de comportamiento se ilustran en el anexo G y H, respectivamente.

Tabla 10. Resistencia a la compresión vertical de botella con 5% y 8% de PET en estado amorfo.

| Resistencia (kg-F) | | |
|--------------------|---------------|---------------|
| Muestra | 5% | 8% |
| 1 | 29.01 | 37.21 |
| 2 | 26.5 | 36.63 |
| 3 | 30.79 | 37.02 |
| 4 | 29.45 | 37.68 |
| 5 | 29.73 | 37.71 |
| 6 | 27.5 | 37.97 |
| 7 | 26.4 | 34.86 |
| 8 | 28.81 | 28.46 |
| 9 | 28.15 | 31.59 |
| 10 | 29 | 35.58 |
| Promedio | 28.534 | 35.471 |

Fuente: elaboración propia.

5.3.2 Medición de resistencia a la presión interna. Las pruebas de presión interna se llevaron a cabo en el equipo Atrya BR-6000P según procedimiento interno de la empresa para botella de PET⁸⁷, el cual se describe en el literal 4.2.2. Los resultados obtenidos se ilustran en la tabla 11 para las botellas con 5% y 8% de PET en estado amorfo. Para el caso donde el resultado fue falla, en la figura 27 se evidencia el estado de la botella tras no pasar la prueba.

⁸⁶ IBERPLAST S.A.S. RESISTENCIA A LA CARGA VERTICAL PARA BOTELLAS DE PET. Op. cit.

⁸⁷ IBERPLAST S.A.S. RESISTENCIA A LA PRESIÓN INTERNA PARA BOTELLAS DE PET. Op. cit.

Tabla 11. Resistencia a la presión interna de botella con 5% y 8% de PET en estado amorfo.

| Resistencia | | |
|-------------|----|-------|
| Muestra | 5% | 8% |
| 1 | OK | OK |
| 2 | OK | OK |
| 3 | OK | OK |
| 4 | OK | OK |
| 5 | OK | Falla |
| 6 | OK | OK |
| 7 | OK | Falla |
| 8 | OK | OK |
| 9 | OK | OK |
| 10 | OK | Falla |

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Botella de PET con prueba fallida.



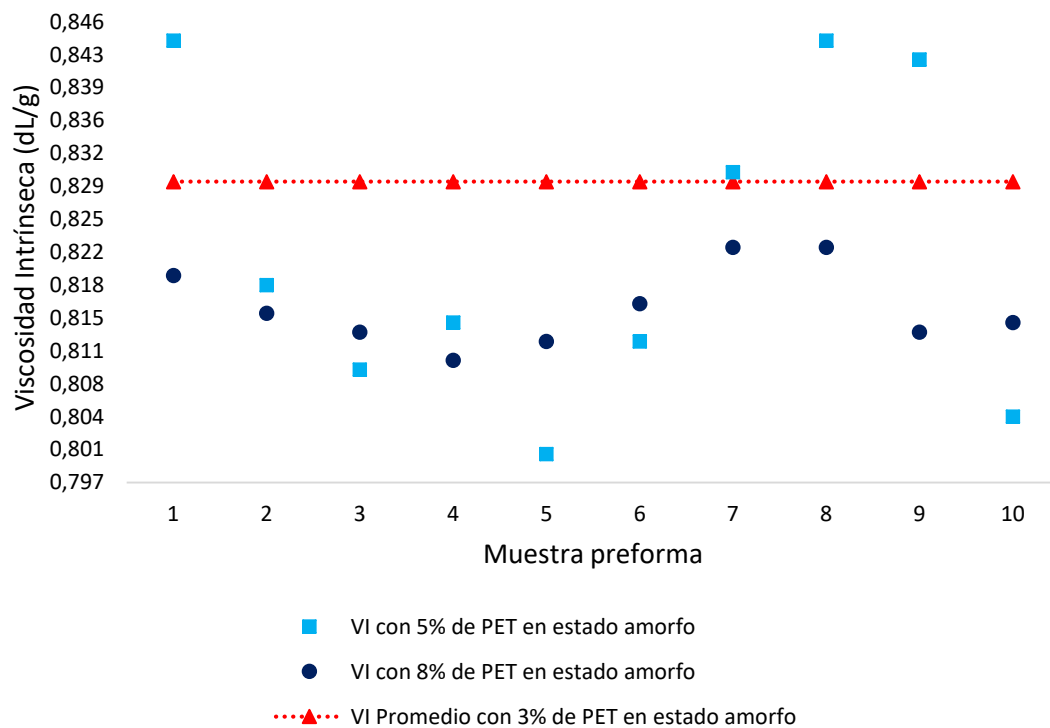
Fuente: elaboración propia.

5.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los resultados obtenidos de los dos ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo, se analizaron a través de un comparativo estadístico de las dispersiones de los valores obtenidos al tener como variable independiente la dosificación de PET en estado amorfo, y como variables dependientes (de respuesta), la viscosidad intrínseca, la concentración de acetaldehído, la resistencia a la carga vertical y la resistencia a la presión interna.

5.4.1 Realización análisis comparativo estadístico de resultados. Inicialmente, se esperaba que al aumentar el porcentaje de PET en estado amorfo la VI se redujera, dado que se tiene en la mezcla inicial un mayor porcentaje de material con baja viscosidad de 0.538 +/-0.024 dL/g, valor encontrado en la caracterización del peletizado al inicio del estudio. Por lo tanto, tomando como punto de referencia el promedio de VI de la dosificación actual que es 0.829 dL/g, se determinó que el 40% de los datos de la dosificación del 5% se encuentran por encima del valor de referencia, tal como se ilustra en la gráfica 3. Lo anterior, atribuido a un error experimental al momento del manejo de las muestras en el horno de vacío usando N₂ gaseoso. Mientras que, para la dosificación del 8% se obtuvo un 100% de datos por debajo de la dosificación actual, dando cumplimiento a lo esperado.

Gráfica 3. VI ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo.



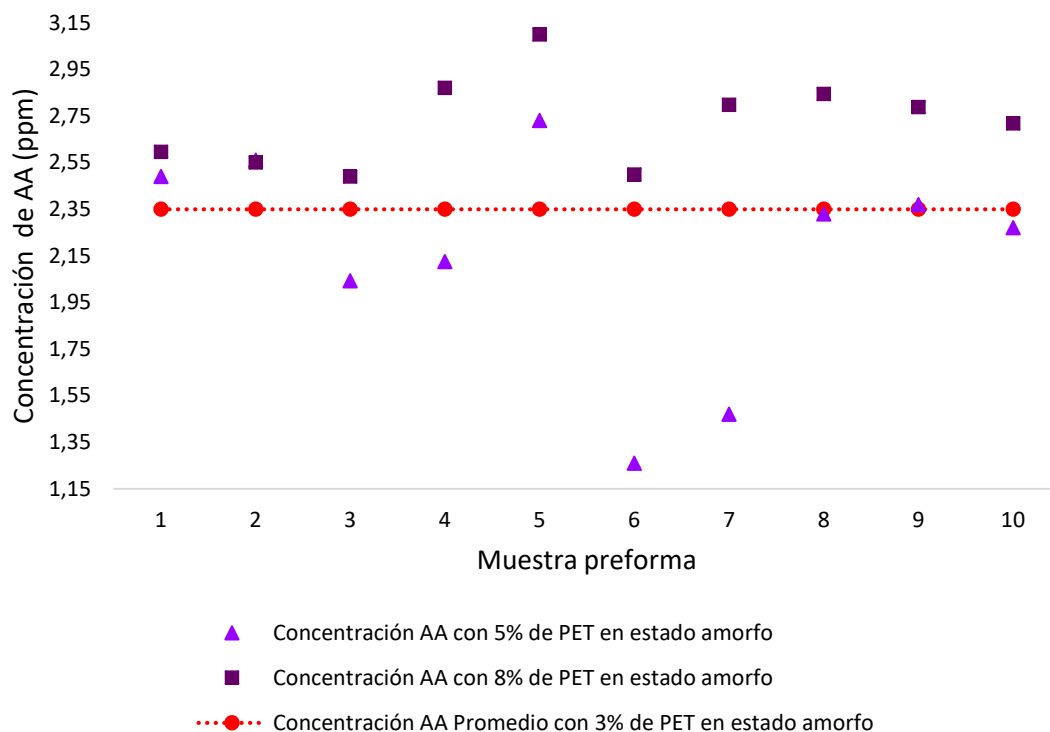
Fuente: elaboración propia.

Para la concentración de AA, como segunda variable de respuesta, hay que tener en cuenta que el material amorfo ya ha sido reprocesado en el reciclaje mecánico, generando así más acetaldehído. Así mismo, el valor encontrado en la caracterización del PET amorfo dio un valor elevado de 3.97ppm. Razón por la cual no se puede esperar la relación directa entre VI y AA, ya que no es lo mismo trabajar

con resina virgen que trabajar con resina reciclada. De ahí que se espera que al aumentar la dosificación de peletizado, su concentración de AA fuese mayor.

Por lo tanto, los resultados obtenidos de la concentración de AA de las dosificaciones de 5% y 8% de peletizado (véase gráfica 4), teniendo en cuenta el promedio de 2.35 ppm para la dosificación actual, mostraron que el 100% de los valores obtenidos con la dosificación de 8% de PET en estado amorfo se encuentran por encima del valor de referencia, dando cumplimiento a lo esperado. Mientras que, el 60% de los datos correspondientes a la dosificación de 5% están por debajo del promedio.

Gráfica 4. Concentración de AA en ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo.

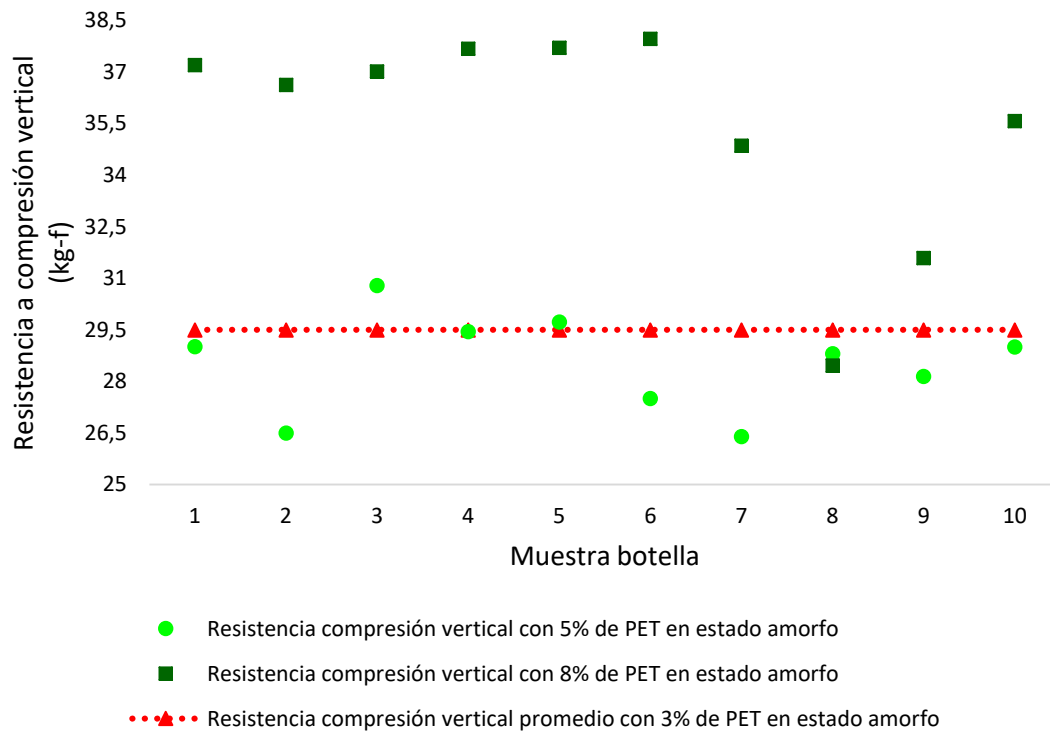


Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la resistencia a la compresión vertical como tercera variable dependiente, y con un promedio de 29.50 kg-f de la dosificación de 3%, los resultados presentados en la gráfica 5 con 5% y 8% de peletizado, evidenciaron que el 90% de los datos de la dosificación de 8% de peletizado se ubican por encima del valor de referencia. En contraste, el 70% de los valores correspondientes al 5% de dosificación de PET en estado amorfo se encuentran por debajo del promedio.

De lo anterior, se observó que la carga vertical fue mayor en la dosificación del 8%, lo cual se atribuye a la distribución del material en la etapa de soplado en donde la temperatura es el factor que genera la variación de este aspecto.

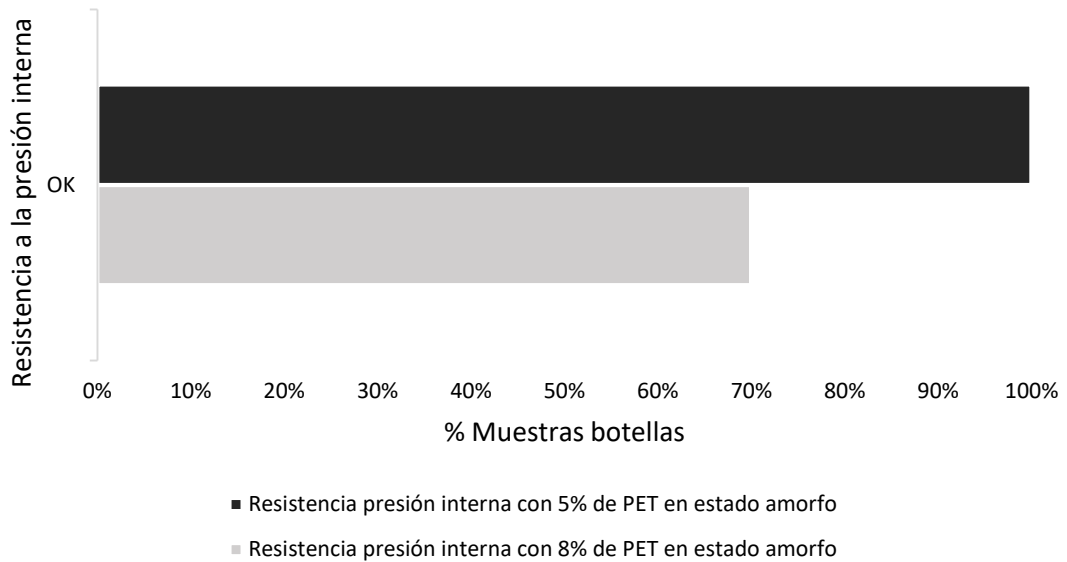
Gráfica 5. Resistencia a la compresión vertical en ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo.



Fuente: elaboración Propia

Como última variable de respuesta, la resistencia a la presión interna demostró que el 30% de las muestras fabricadas con una dosificación del 8% fallaron al explotar dentro del equipo de medición. Mientras que, el 100% de las botellas producidas con 5% de peletizado pasaron la prueba, sin presentar roturo o fisura. Los resultados se ilustran en la gráfica 6.

Gráfica 6. Resistencia a la presión interna en ensayos industriales con 5% y 8% de PET en estado amorfo.



Fuente: elaboración Propia

La dispersión de los resultados obtenidos en las gráficas 3 a la 6 se atribuyen a un error experimental que genera una varianza en los datos, dado que todas las mediciones se realizaron con procedimientos estandarizados y proporcionando las mismas condiciones para cada muestra analizada.

5.4.2 Establecimiento de dosificación de PET en estado amorfo con cumplimiento de especificaciones técnica de producto en la empresa. Teniendo en cuenta los resultados de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los dos ensayos industriales, variando la dosificación en 5% y 8% de PET en estado amorfo con resina virgen, y según lo especificado en las fichas técnicas de las botellas no retornables de 1.5L y 2L, se determinó lo siguiente.

Se consolidaron los requisitos técnicos al no haber variación en los estipulado en ambas fichas técnicas, tomando en cuenta las condiciones de la botella para bebida carbonatada, respecto a: las características específicas de “índice de viscosidad intrínseca entre 0.810 – 0.860 dL/g* y bajo nivel de acetaldehído”⁸⁸; pruebas y/o ensayos que determinan, para la resistencia a la carga vertical que “la botella sometida a esta prueba debe resistir una carga mayor o igual a 17 kg-f antes de sufrir la primera deformación”⁸⁹, y para la resistencia a la presión interna que “la

⁸⁸ IBERPLAST S.A.S. FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO BOTELLA 2.0 LITROS GENÉRICA. Op. cit.

⁸⁹ *Ibid.*, p. 2.

botella llena de agua y sometida a una presión interna mínima de 135 psi por un periodo de 13 segundos, no deberá presentar rotura alguna, ni reversión de base⁹⁰.

De manera que, la dosificación de 5% de PET en estado amorfo es la que da cumplimiento a las especificaciones técnicas de producto en Iberplast S.A.S.: la VI de dicha dosificación es en promedio de 0.822 dL/g mientras que del 8% es de 0.818 dL/g. Por tanto, ésta se selecciona al ser más favorable una viscosidad intrínseca con mayor valor, debido a que representa mejores resultados en las propiedades mecánicas, las cuales se analizarán más adelante.

La concentración de AA en ambas dosificaciones da cumplimiento a lo requerido de valores menores a 10 ppm para bebidas carbonatas, al tener un promedio de 2.165 ppm para el 5% de PET en estado amorfo y 2.707 ppm para la dosificación del 8%. Sin embargo, al ser el acetaldehído “una impureza común generada de polimerización del PET, debe mantener en un contenido mínimo que no afecte el producto final embalado en el envase”⁹¹. Así mismo, “por la facilidad a emigrar del AA desde la pared de la botella y difundirse en el contenido de la misma, la generación de este producto debe ser cuidadosamente controlada durante la inyección de la preforma”⁹². Teniendo en cuenta lo anterior, la dosificación de 5% es la que menor promedio de concentración de AA posee y, por tanto, la más favorable.

Las propiedades mecánicas presentaron mejores resultados para la dosificación de 5% que presentó un mayor índice de VI, recordando que “el peso molecular del polímero es importante porque determina propiedades mecánicas tales como rigidez, resistencia, viscoelasticidad, tenacidad y viscosidad”⁹³. Lo anterior se comprueba con los resultados a la resistencia a la presión interna, para el 5% tuvo un 100% de botellas que pasaron la prueba mientras que con el 8% el porcentaje de botellas fue de tan solo 70%.

En cuanto a la resistencia a la compresión vertical, la botella con dosificación de 8% de PET en estado amorfo soportó en promedio 35.943 kg-f, mientras que la del 5% 28.534 kg-f, ambas dando cumplimiento a lo requerido en la empresa. Por tanto, fue necesario tener en cuenta el promedio de la dosificación actual para determinar la mejor dosificación: la diferencia radica en la distribución del material en el soplado

⁹⁰ *Ibíd.*, p. 2.

*Para la botella no retornable de 1.5L se especifica un índice de viscosidad intrínseca entre 0.790 – 0.860 dL/g, lo cual no representa una variación significativa respecto al rango de la botella no retornable de 2L. Cabe mencionar que, **el VI y concentración de AA no depende del gramaje de la botella.**

⁹¹ MÉNDEZ, Adrián. Cómo participa la formación de acetaldehído en el procesamiento del PET. Op. cit.

⁹² *Ibíd.*

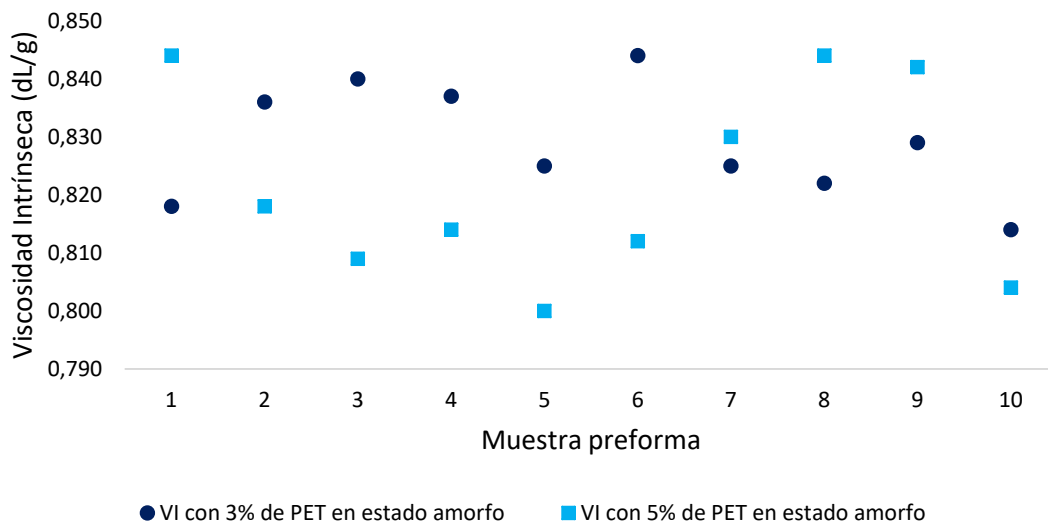
⁹³ PLASTICS TECHNOLOGY. Y la viscosidad, ¿qué papel juega cuando se procesa el PET? Op. cit.

para la dosificación del 8%, ya que los resultados tuvieron una gran dispersión en comparación con la del 3%. Mientras que, la dosificación del 5% presentó un comportamiento similar a la dosificación que se trabaja actualmente en producción, razón por la cual se considera más favorable.

5.4.3 Comparación de resultados de botella y preforma con dosificación de PET en estado amorfo actual y la establecida. Tras establecer la dosificación de 5% de PET en estado amorfo, según los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas medidas en los ensayos industriales, se procede a compararlos con los reportados con la dosificación actual de 3% de peletizado.

Para el índice VI de ambas dosificaciones, ilustrado en la gráfica 7, se encontró que para la dosificación actual el promedio se encuentra en 0.829 dL/g, y para la dosificación de 5% de peletizado se obtuvo un promedio de 0.822 dL/g, representando una diferencia de 0.007 dL/g.

Gráfica 7. Viscosidad intrínseca con 3% y 5% de PET en estado amorfo.

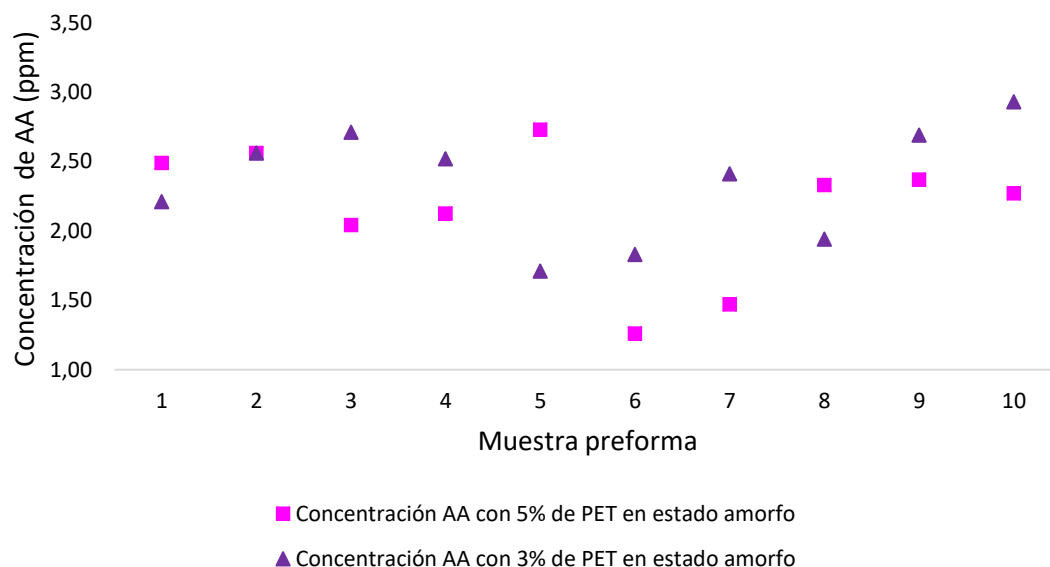


Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que los valores de la viscosidad intrínseca dependen tanto de la resina como de la eficiencia del secado, y que técnicamente al aumentar la dosificación de peletizado este índice de viscosidad debería disminuir, en la anterior figura se apreciaron gráficamente valores del 5% por encima de los del 3%. Lo anterior debido a las condiciones de secado con N₂ gaseoso de las muestras durante el procedimiento de medición en el laboratorio.

Respecto a la concentración de AA, la gráfica 8 muestra una dispersión de los datos, dentro de los cuales se calculó un promedio de 2.35 ppm para la dosificación de 3% y 2.16 ppm para 5% de peletizado. Se encontró una diferencia de 0.19 ppm, debido a una variación de la temperatura en la máquina de inyección, la cual se encuentra fuera de los límites de control del presente estudio. Teóricamente al aumentar el porcentaje de material reciclado mecánicamente a la materia prima del proceso de inyección, la concentración de AA de la preforma debería incrementarse. Sin embargo, los valores obtenidos con la dosificación de 5% de peletizado se encuentran por debajo de la especificación máxima permitida en la empresa para los envases analizados.

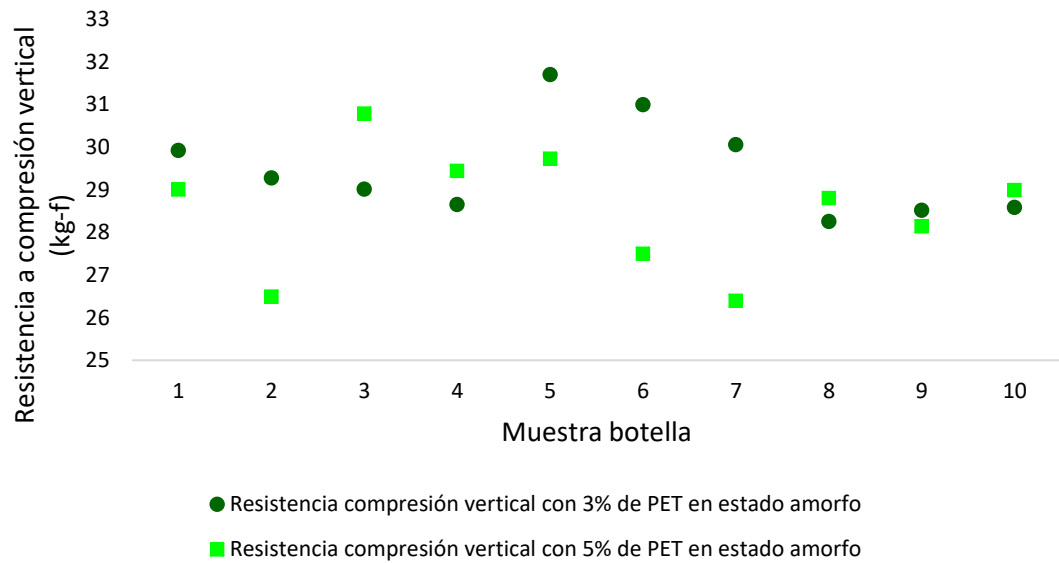
Gráfica 8. Concentración de AA con 3% y 5% de PET en estado amorfo.



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los resultados de la prueba de resistencia a la compresión vertical (véase gráfica 9) se determinó que, para la dosificación actual el promedio fue de 29.503 kg-f y para 5% de peletizado 28.534 kg-f, representando así una diferencia de 0.969 kg-f. Lo anterior evidencia una poca dispersión de los datos graficados, dado que las distribuciones del material a lo largo de la botella con las dosificaciones analizadas se consideran homogéneas y, por tanto, no generan mayores diferencias en los resultados de la prueba realizada. Respecto al efecto del aumento de peletizado, se presentó una disminución en la resistencia a la carga vertical, hecho que se cumple según los datos presentados pero que mantiene el producto dentro de los estándares para su uso en bebidas carbonatadas de la empresa, según la ficha técnica de la botella.

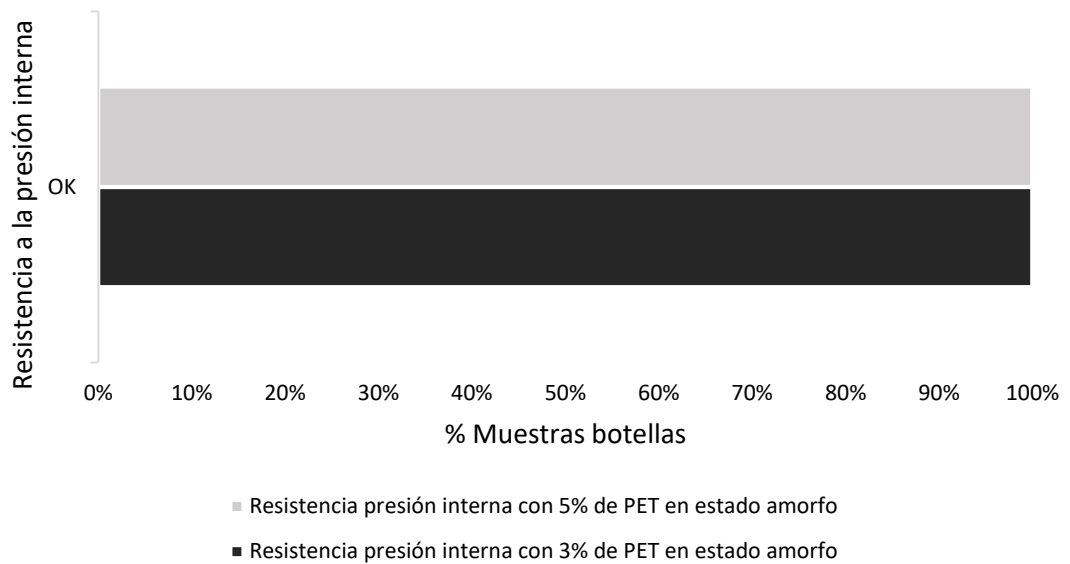
Gráfica 9. Resistencia a la compresión vertical en ensayos industriales con 3% y 5% de PET en estado amorfo.



Fuente: elaboración propia.

En la resistencia a la presión interna se observó que no hay dispersión de los datos, puesto que en ambas dosificaciones el 100% de las botellas cumplieron satisfactoriamente la prueba realizada, es decir, no presentaron rotura ni fisura. Los resultados se presentan en la gráfica 10.

Gráfica 10. Resistencia a la presión interna en ensayos industriales con 3% y 5% de PET en estado amorfo.



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados de las propiedades fisicoquímicas de la preforma y las propiedades mecánicas de la botella, realizadas en la corrida industrial con las dosificaciones de 5% y 8% de PET en estado amorfo, y según lo determinado en el desarrollo experimental, se estableció a nivel industrial la dosificación de 5% de peletizado, la cual da cumplimiento a las especificaciones técnicas de producto de la empresa.

6. ANÁLISIS FINANCIERO

Con el fin de mostrar los beneficios económicos que trae consigo el incremento de la dosificación de PET en estado amorfo, obtenido por reciclaje mecánico, al proceso de inyección y soplado de botellas no retornables de un 3% a un 5%, en este capítulo se presentan inicialmente dos datos relevantes: la cantidad de toneladas de PET en estado amorfo empleado con la dosificación actual de 3% y el costo de las resinas homologadas utilizadas en el proceso de fabricación de preformas. Para así calcular y evidenciar la disminución de costos de compra de materia prima aplicando el aumento al 5% de peletizado, establecido en el ensayo industrial.

Se presenta un análisis comparativo de costos de producción de preforma entre la dosificación de PET en estado amorfo actual (3%) y la establecida industrialmente (5%).

6.1 DATOS INDUSTRIALES

Se recolectaron los datos correspondientes al periodo comprendido entre agosto y diciembre de 2019, los cuales se presentan a continuación.

6.1.1 Costo y cantidad de materia prima virgen para fabricación de preforma.

El consumo mensual de materia prima virgen para el proceso de producción de preformas, teniendo en cuenta la dosificación actual en la formulación de 3% de peletizado, es de 2425 Ton/mes lo que representa un costo de 5.040.000 \$USD/mes.

6.1.2 Cantidad de PET en estado amorfo con dosificación actual utilizada en proceso. Los consumos de PET en estado amorfo empleado con la dosificación actual de 3% en la formulación para la producción de preformas, se enlistan en la tabla 12 para los 6 meses comprendidos entre agosto y diciembre de 2019.

Tabla 12. Excedentes industriales producidos y consumidos en los meses de agosto a diciembre de 2019.

| Mes (2019) | Total excedentes industriales producidos (Ton) | Consumo de PET en estado amorfo de 3% (Ton) |
|------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Agosto | 160.570 | 86.222 |
| Septiembre | 85.243 | 59.805 |
| Octubre | 139.145 | 89.791 |
| Noviembre | 163.996 | 133.109 |

Tabla 12. (Continuación)

| Mes (2019) | Total excedentes industriales producidos (Ton) | Consumo de PET en estado amorfo de 3% (Ton) |
|-------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Diciembre | 148.717 | 123.621 |
| Promedio | 139.534 | 98.492 |

Fuente: elaboración propia.

6.2 CÁLCULO DE DISMINUCIÓN DE COSTOS DE COMPRA DE RESINA HOMOLOGADA

Teniendo en cuenta los costos enunciados en la tabla 13 de compra de resina virgen con la dosificación actual de 3% de PET en estado amorfo, y la dosificación establecida a nivel industrial de 5% de peletizado, se calculó un ahorro de 40.000 \$USD.

Tabla 13. Ahorro en compra de resina virgen con dosificación de 5% de peletizado.

| Dosificación de peletizado en formulación | Compra de resina virgen (Ton/mes) | Precio \$USD/mes |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|
| 3% | 2425 | 5.040.000 |
| 5% | 2375 | 5.000.000 |
| Ahorro USD | | 40.000 |

Fuente: elaboración propia.

6.3 ANÁLISIS DE COSTOS

En el segundo semestre de 2019, en el periodo comprendido entre agosto y diciembre se produjeron en promedio 139.534 Ton de excedentes industriales, de los cuales el 71% (equivalentes a 98.492 Ton) se consumieron de PET en estado amorfo con dosificación de 3%.

Con la dosificación actual se compraron 2425 Ton/mes de resina virgen equivalente a 5.040.000 \$USD mensuales. Al incrementar la dosificación de peletizado del 3% al 5%, establecida a nivel industrial, la compra disminuye a 2375 Ton/mes de resina virgen, lo que representa un ahorro de 40.000 \$USD mensuales y 50 toneladas menos de compra de resina virgen respecto a la dosificación actual.

De acuerdo a la tabla 13, y teniendo en cuenta que el objetivo del presente proyecto es evaluar el incremento de la dosificación de PET en estado amorfo, se determinó que emplear el 5% peletizado genera mayor recirculación del material al proceso de

fabricación de preformas, incurriendo en menores costos y tiempo de almacenamiento, lo que evita su contaminación o daño y que se representaría en pérdidas económicas.

Por lo tanto, el uso de la dosificación de 5% de peletizado representa un beneficio económico para la empresa desde el punto de vista operacional, gracias al mayor uso del material PET reciclado, obtenido del reciclaje mecánico realizado en la compañía, representando menores cantidades requeridas de resina virgen, es decir, menor inversión.

Cabe mencionar que, para el cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) se requieren los flujos de caja anuales, que a su vez se estiman a partir de las siguientes variables: ingresos, costos (mano de obra, materia prima, mantenimiento mensual, distribución mensual), gastos (arriendo, servicios, nómina administrativa, otros conceptos), depreciación (de maquinaria, muebles, computadores, vehículos, etc.), gastos financieros, e impuestos. Por lo anterior, y teniendo en cuenta que no se tiene conocimiento de dicha información financiera de la empresa, no se realizó el respectivo cálculo de este indicador general.

Finamente, se realizó el análisis de costos teniendo en cuenta el incremento de dosificación de Polietilentereftalato en estado amorfo establecido a nivel industrial, calculando la reducción de costos de compra de resina virgen con 5% de peletizado respecto a la dosificación usada actualmente y determinando los beneficios que representa a nivel de proceso de producción.

7. CONCLUSIONES

- La caracterización del Polietilentereftalato en estado amorfo, obtenido de excedentes industriales para la fabricación de botellas no retornables, permitió definir mediante promedio los rangos de las propiedades fisicoquímicas medidas: 0.538 +/-0.024 dL/g de viscosidad intrínseca, con una desviación de 0.062 dL/g respecto al promedio de 0.600 dL/g reportado en la literatura; 4.00 +/-2.00 ppm de concentración de acetaldehído, cumpliendo la normatividad de menos de 10ppm para bebidas carbonatadas; 1.53 +/-0.05 g/cm³ de densidad, por encima de lo establecido teóricamente de máximo 1.42 g/cm³ y 129+/-22 g/10min de índice de fluidez, del cual no se encontraron valores de referencia.
- El diagnóstico de propiedades fisicoquímicas y mecánicas de preformas y botellas no retornables de 2L, fabricadas con la dosificación actual de PET en estado amorfo de 3%, permitió determinar respecto a la ficha técnica interna: viscosidad intrínseca de 0.829 dL/g, mayor a 0.810 dL/g requeridos; concentración de acetaldehído de 2.35 ppm, menor a las 10 ppm estipuladas; resistencia a la compresión vertical de 29.503 kg-F, siendo mayor a la carga mínima de 17 kg-F y, sin falla de ninguna botella en la prueba de resistencia a la presión interna a 135 psi durante 13 segundos.
- Mediante los ensayos industriales variando la dosificación de peletizado en 5% y 8% con resina virgen y el desarrollo experimental realizado, se estableció el incremento de 5% de Polietilentereftalato en estado amorfo, cumpliendo las especificaciones técnicas de las botellas no retornables para bebidas carbonatadas, ya que su índice de viscosidad fue mayor, representando mejores resultados en las propiedades mecánicas. Mientras que, la concentración de acetaldehído tuvo menor promedio, siendo más favorable teniendo en cuenta que es una impureza y debe mantenerse en un contenido mínimo. Con la dosificación establecida no hubo falla a la resistencia a la presión interna, caso contrario con el uso de 8% de peletizado.
- La comparación de los valores de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas con la dosificación actual de peletizado (3%) y la establecida (5%), mostró una diferencia de 0.007 dL/g para VI, 0.19 ppm para la concentración de AA, 0.969 kg-f para la resistencia a la compresión vertical, y sin variación de resultados en la prueba a la presión interna.
- Finalmente, el análisis de costos permitió determinar los beneficios económicos que representa el incremento de la dosificación establecida a nivel industrial de 5% de Polietilentereftalato en estado amorfo, al calcular un ahorro de 40.000

\$USD/mes, es decir, 50 Ton/mes menos de compra de resina virgen y el reintegro de mayor porcentaje de material, equivalente a menores costos de almacenamiento de peletizado, en el proceso de producción de preformas y botellas no retornables para bebidas carbonatadas.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar más mediciones de índice de fluidez para el PET en estado amorfo, dado que no hay información guía en la literatura, con el fin de ir ajustando su rango según la reproducibilidad de resultados que se hallen en su caracterización.
- De igual forma, ejecutar un mayor número de mediciones para poder realizar un análisis estadístico de las muestras, al momento de seleccionar industrialmente el incremento de PET en estado amorfo.
- Así mismo, identificar la variable de control de proceso de inyección que genera dispersión en los resultados de las pruebas fisicoquímicas de la preforma, para disminuir el error experimental.
- Además, realizar ensayos industriales con dosificaciones intermedias entre 5% y 8% de PET en estado amorfo, para evaluar su viabilidad en el proceso de producción de botellas no retornables para bebidas carbonatadas.
- Finalmente, llevar a cabo el presente estudio variando la capacidad nominal de botellas para bebidas carbonatadas, con el fin de evidenciar el efecto que tiene esta característica al aumentar la dosificación de Polietilentereftalato en estado amorfo.

BIBLIOGRAFÍA

AINIA y AIMPLAS. La correcta especificación de los envases. [En línea], 2016. p.23. [Consultado el 12-12-2019]. Disponible de internet: <https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos_publicaciones_empresas/la-correcta-especificacion-de-los-envases.pdf>

ALMAZAN, Diego. Simulación del proceso de transferencia de calor para el moldeo de preformas de PET. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Métodos de medición de viscosidad intrínseca. *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*. 2016. ASTM D1238.

_____. *Standard Test Method for Determination of Residual Acetaldehyde in Polyethylene Terephthalate Bottle Polymer Using an Automated Static Head-Space Sampling Device and a Capillary GC with a Flame Ionization Detector*. 2016. ASTM F2013-10.

ANÓNIMO. Sólidos cristalinos y amorfos. [En línea], 2016 [Consultado el 3-12-2019]. Disponible de internet: <<https://cpig.wordpress.com/2016/04/27/solidos-cristalinos-y-amorfos/>>

ATRYA. Manual de Operación y Servicio Probador de Resistencia a la Presión Interna. 2015.

BENÍTEZ, Eileen. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA 5S's de LEAN MANUFACTURING EN EL ÁREA DE INYECCIÓN DE PREFORMAS DE IBERPLAST S.A. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería, 2012.

DIRECTINDUSTRY. Cromatógrafo de gases. [En línea], 2019 [Consultado el 21-12-2019]. Disponible de internet: <https://img.directindustry.es/images_di/photo-g/14711-13240375.jpg>

EDOMEX. ¿Qué es Polietileno-Tereftalato? [En línea], 2018 [Consultado el 20-11-2019]. Disponible de internet: <https://sma.edomex.gob.mx/que_es_polietilenotereftalato>

ESPARZA, María. Evaluación del Efecto de Parámetros de Proceso sobre las Propiedades de Piezas de PET y PBT Moldeadas por Inyección. Trabajo de Grado

Maestría en Tecnología de Polímeros. Saltillo: Centro de Investigación en Química Aplicada, 2005.

EWENDER, Johann & WELLE, Frank. *Determination of the Migration of Acetaldehyde from PET Bottles into Non-carbonated and Carbonated Mineral Water*. [En línea], noviembre, 2008 [Consultado el 15-12-2019]. Disponible de internet:

<https://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/en/documents/Forschungsfelder/Produktsicherheit-und-nalytik/Determination_of_the_Migration_of_Acetaldehyde.pdf>

HERNÁNDEZ, Juan Carlos. Nota Técnica: Principio de funcionamiento del sistema de inyección y análisis para la comprensión de la influencia del defecto rebaba de preformas PET. En: Revista Ingeniería UC. Enero-abril, 2013. vol. 20 (1).

HERRERA, Adán. Densidad y posición de transferencia, dos conceptos claves en moldeo por inyección. [En línea] 10, abril, 2016 [Consultado el 13-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/densidad-y-posicin-de-transferencia-dos-conceptos-clave-en-moldeo-por-inyeccin>>

IBERPLAST S.A.S. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA EN PET. 2019. PE 11102.

_____. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD INTRINSECA EN PET. 2019. PE 11102.

_____. FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO BOTELLA 2.0 LITROS GENÉRICA – PCO 1881 28 mm. 2014. PIB 11359.

_____. GUÍA DE DEFECTOS EN INYECCIÓN. 2019.

_____. PREFORMA NO RETORNABLE. 2019. NI 11019.

_____. Preformas PET. [En línea], 2019 [Consultado el 02-10-2019]. Disponible de internet: <<https://www.iberplast.com.co/division-plastica/preformas>>

_____. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACION DEL EQUIPO PARA ENSAYOS UNIVERSALES INSTRON. 2019. NO 11000.

_____. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL MEDIDOR DE PRESIÓN. 2019. NO 11001.

_____. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL HORNO DE VACÍO. 2019. NO 11058.

_____. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL CROMATÓGRAFO DE GASES CLARUS 580 Y HEADSPACE TURBOMATRIX 40. 2019. NO 11063.

_____. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO Y OPERACIÓN DEL MOLINO CENTRÍFUGO RETSCH ZM200. 2019. NO 11064.

_____. PROCEDIMIENTO OPERATIVO, DE INSPECCIÓN Y CONTROL DEL PROCESO EN EL CRISTALIZADOR. 2019. NO 44011.

_____. RESISTENCIA A LA PRESIÓN INTERNA PARA BOTELLAS DE PET. 2019. PE 11006.

_____. RESISTENCIA A LA CARGA VERTICAL PARA BOTELLAS DE PET. 2019. PE 11007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 P.

LAZA, J.M., y RUIZ, L. Estado amorfo. Transición vítrea. [En línea], 2014 [Consultado el 30-11-2019]. Disponible de internet: <https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/8680/mod_resource/content/1/Tema_3._Estado_amorfo._Transicion_vitrea.pdf>

LIZARAZO, Jenny. Determinación de las condiciones más favorables para el reciclaje mecánico de excedentes industriales del polietileno tereftalato en la empresa Iberplast S.A.S. Trabajo de grado Magister en Diseño y Gestión de Procesos. Bogotá D.C.: Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería, 2019.

MARIS, Joachim, *et al*, *Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes*. En: *Revista Polymer Degradation and Stability*. 2017. DOI: 10.6100/IR783771.

MAVERICK PDM. *Plastic Blow Molding*. [En línea], 2018 [Consultado el 23-11-2019]. Disponible de internet: <<https://www.maverickpdm.com/blow-molding-learning-center>>

MÉNDEZ, Adrián. Cómo participa la formación de acetaldehído en el proceso del PET. [En línea], 1, marzo, 2018 [Consultado el 15-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/c%C3%B3mo-participa-la-formaci%C3%B3n-de-acetaldeh%C3%ADdo-en-el-procesamiento-del-pet>>

_____. La cristalinidad, ¿amigo o enemigo? durante el procesamiento del PET. [En línea], 01, mayo, 2017 [Consultado el 29-11-2019]. Disponible de internet:

<<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/la-cristalinidad-amigo-o-enemigo-durante-el-procesamiento-del-pet>>

_____. Parámetros clave a considerar durante el procesamiento del PET. [En línea], 1, marzo, 2017 [Consultado el 3-12-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/parmetros-clave-a-considerar-durante-el-procesamiento-del-pet>>

METALINSPEC. Instron – Equipos para Pruebas Mecánica de Materiales [En línea], 2019 [Consultado el 10-01-2020]. Disponible de internet: <<https://www.metalinspec.com.mx/marcas/instron>>

MILLER, R.G.J. and WILLIS, H.A. *Journal of Polymer Science*. 1956. vol.10. p.401

MIRCAN. Viscosensor. [En línea], 2019 [Consultado el 2-12-2019] Disponible de internet: <<http://www.mircan1979.com/es/marques/dynisco/>>

MITCHELL, Daniel. GREMIO ACOPLÁSTICOS ACELERARÁ LA AGENDA AMBIENTAL EN EL PAÍS. [En línea], 2018 [Consultado el 1-09-2019]. Disponible en:< <http://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-noti/131-ns-170724>>

MONTEIRO, Carlos, et al. *Fuzzy Method for in Control Acetaldehyde Generation in Resin PET in the Process of Packaging Pre-Forms of Plastic Injection*. En: *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (UAERS)*. Agosto, 2018. Vol. 5, no. 8, p. 240. DOI: 10.22161/ijaers.5.8.29

PLASTICS TECHNOLOGY. Y la viscosidad, ¿qué papel juega cuando se procesa el PET? [En línea], 2017 [Consultado el 13-11-2019]. Disponible de internet: <<https://www.ptmexico.com/articulos/y-la-viscosidad-que-papel-juega-cuando-se-procesa-el-pet->>

POSADA, Beatriz. La degradación de los plásticos. En: Revista Universidad EAFIT. s.f. no. 94.

PROCESOS INDUSTRIALES (PET). Síntesis Química del Pet. [En línea], 2013 [Consultado el 27-02-2020]. Disponible en: <<http://ecologia-4-a.blogspot.com/2013/10/sintesis-quimica-del-pet-lospoliesteres.html>>

PUENTE, Publio. Determinación de la densidad de la fibra poliéster por el método “columna gradiente de densidades”. En: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (Sección Textil). s.f.

RETSCH. *Cutting Mills* ZM200. [En línea], 2019 [Consultado el 15-12-2019]. Disponible de internet: <https://www.retsch.com/products/milling/cutting-mills/sm-100/function-features/>

REYES, Martín y RIVERA, Moisés. Estructura de sólidos amorfos. En: Ingenierías. octubre-diciembre 2000. vol. 2.no 9.

SEPE, Michael. Poliésteres PBT y PET: la cristalinidad hace la diferencia. [En línea], 29, septiembre, 2012 [Consultado el 10-10-2019]. Disponible de internet: <<https://www.pt-mexico.com/columnas/polisteres-pbt-y-pet-la-cristalinidad-hace-la-diferencia>>

SIERRA, Noralba., *et al.* Protocolo para el control de calidad de envases plásticos, utilizados en la industria farmacéutica, de cosméticos y de alimento. En: Revista Colombiana de Ciencias Químico – Farmacéuticas. 25, octubre, 2010. vol. 39 (2).

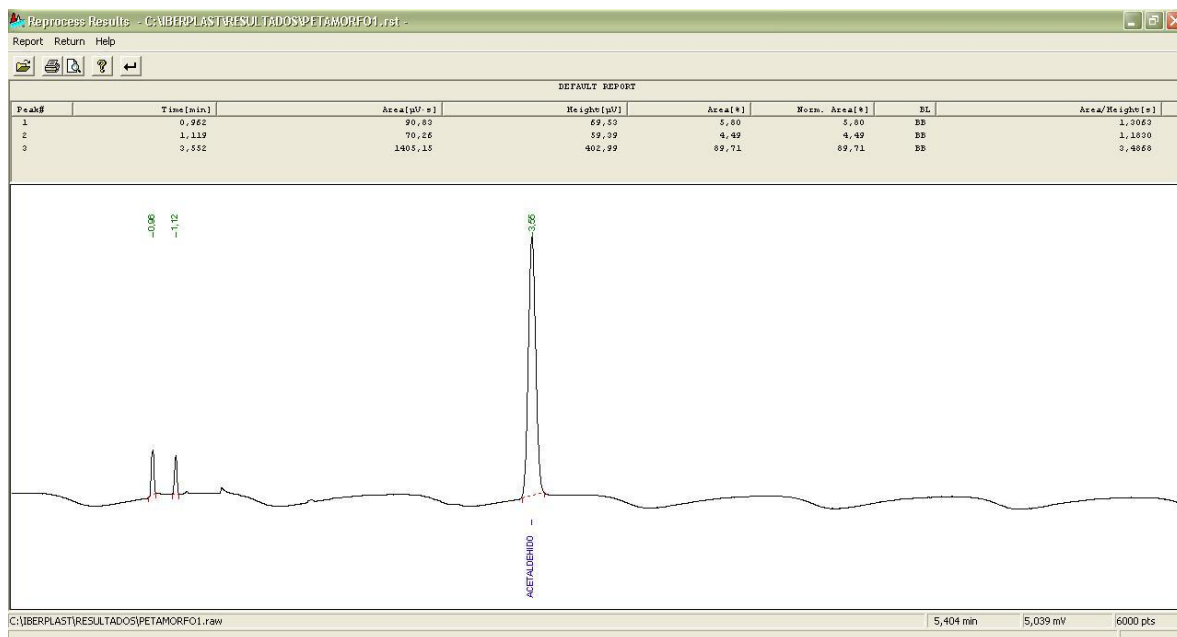
TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Inyección – soplado. [En línea] Marzo, 2012 [Consultado el 25-09-2019]. Disponible de internet: <<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/03/inyeccion-soplado.html>>

_____. Propiedades mecánicas. [En línea], 25, junio, 2011 [Consultado el 12-12-2019]. Disponible de internet: <<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-mecanicas.html>>

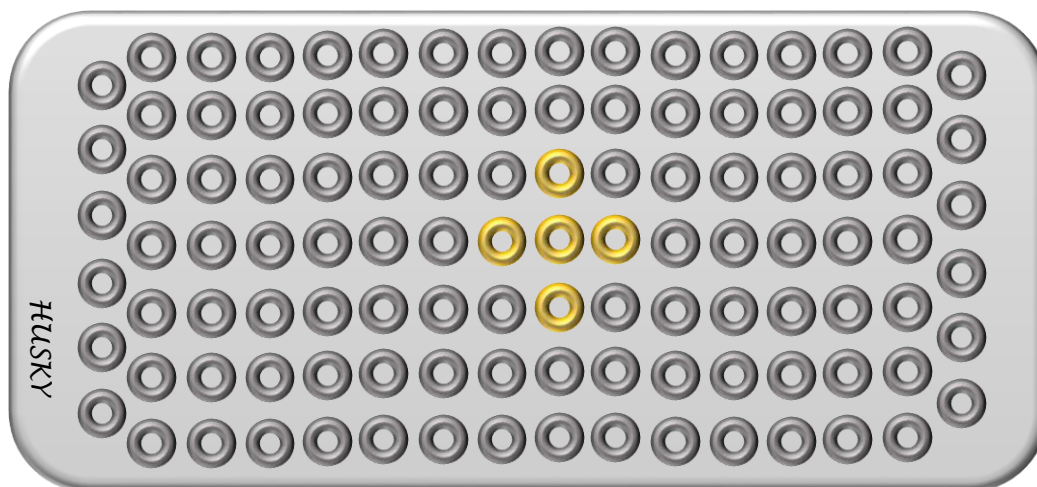
TORRES, Angélica. Diseño del procedimiento para la realización de ensayos en el laboratorio de una industria productora de resina PET reciclado. Trabajo de grado Licenciado en Ingeniería Química. San José: Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería, 2013.


ANEXOS

ANEXO A. CROMATOGRAMA DEL PET EN ESTADO AMORFO.



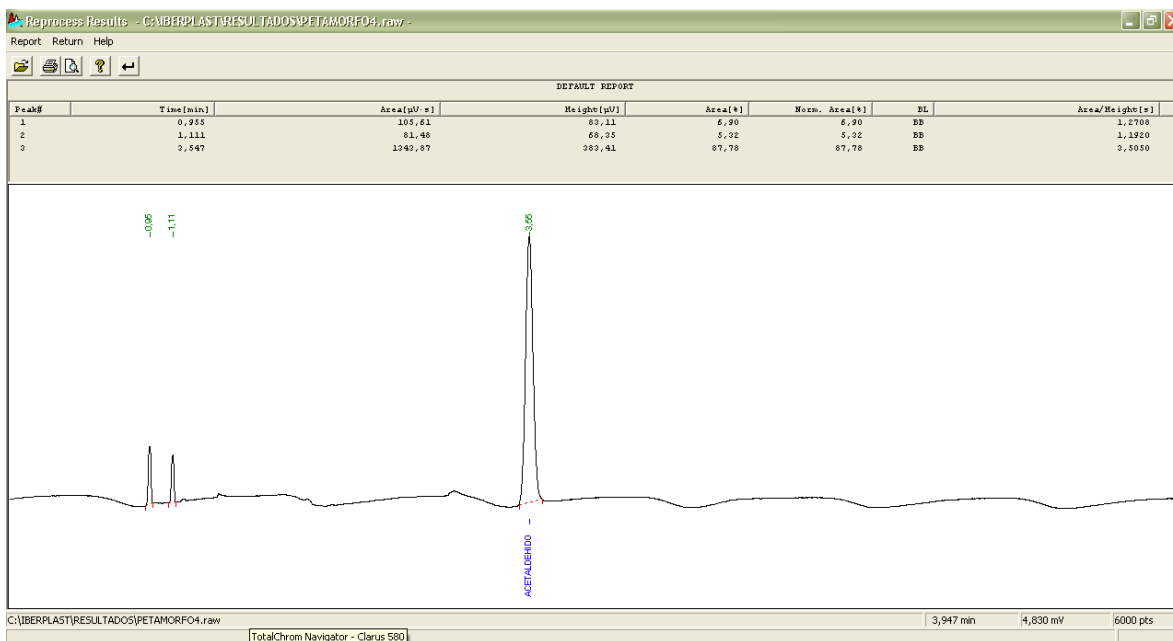
ANEXO B.
MOLDE HUSKY DE INYECCIÓN DE PREFORMA DE 40g Y 50g



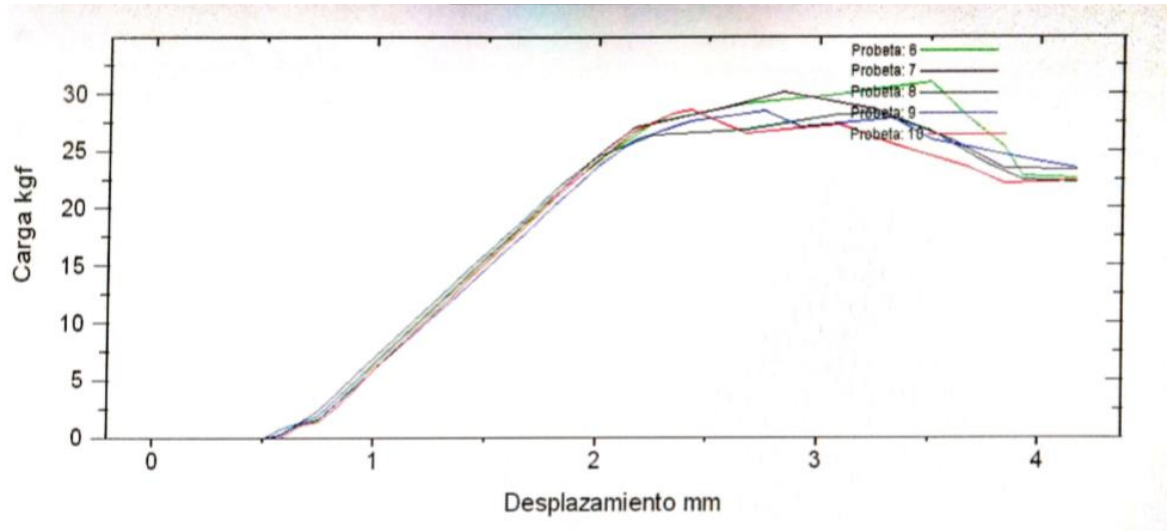
 Cavidades críticas

ANEXO C.

CROMATOGRAMA DE PREFORMA CON 3% DE PET EN ESTADO AMORFO.

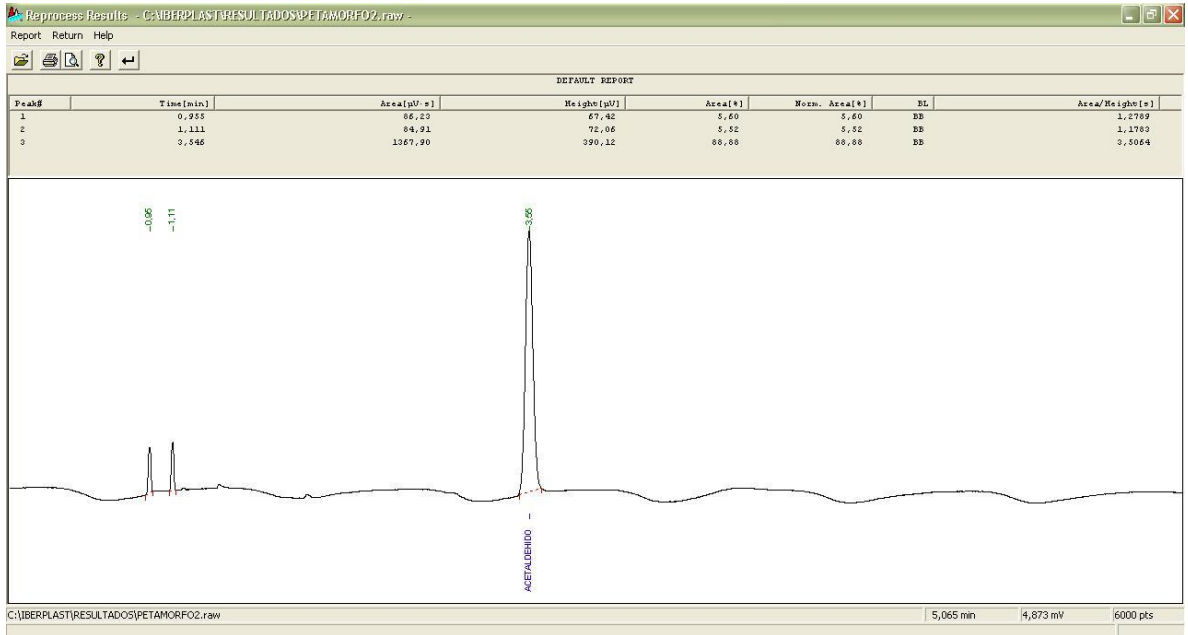


ANEXO D.
CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA CARGA VERTICAL
DE PREFORMA CON 3% DE PET EN ESTADO AMORFO.



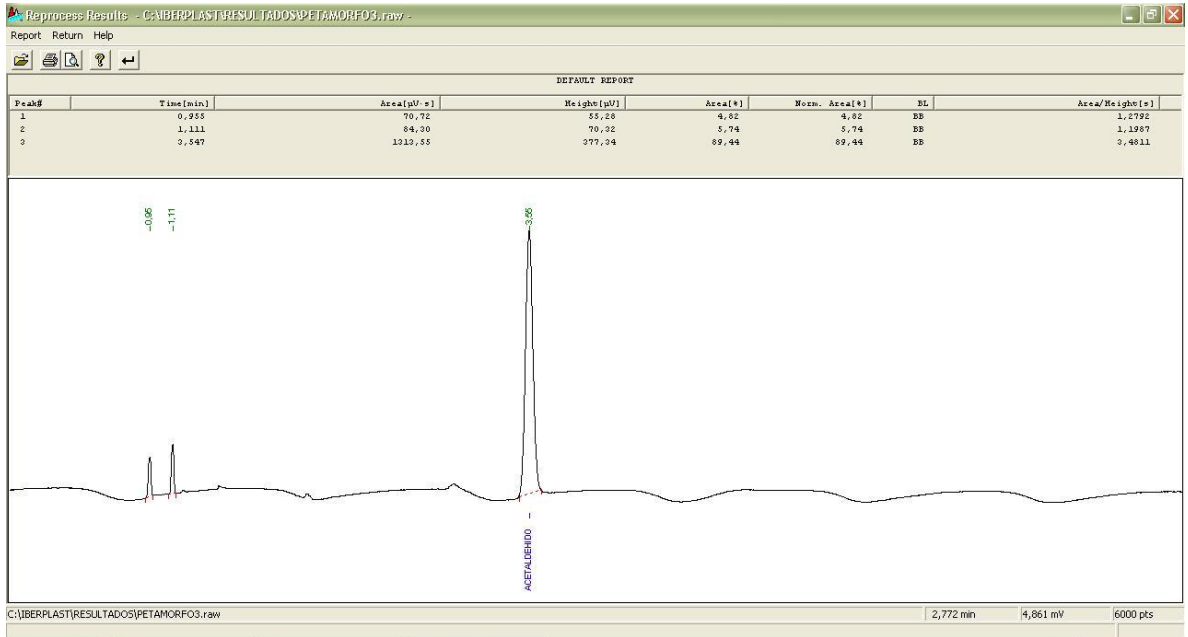
ANEXO E.

CROMATOGRAMA DE PREFORMA CON 5% DE PET EN ESTADO AMORFO.

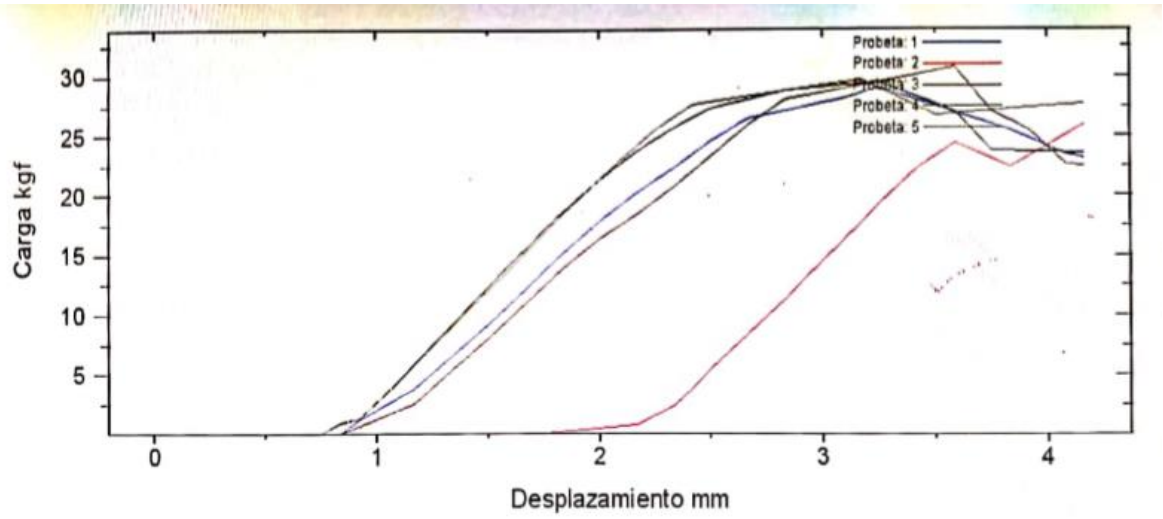


ANEXO F.

CROMATOGRAMA DE PREFORMA CON 8% DE PET EN ESTADO AMORFO.



ANEXO G.
CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA CARGA VERTICAL DE PREFORMA CON 5% DE PET EN ESTADO AMORFO.



ANEXO H.
CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA CARGA VERTICAL
DE PREFORMA CON 8% DE PET EN ESTADO AMORFO.

