

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Optimización del proceso de sellado en empaques flexibles para una línea de
producción de galletas.

INGE-2417

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

José Elías Hernández Tamayo

Abner Javier Martínez Ramírez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico primeramente a Dios por acompañarme en mi camino hacia esta meta, se la dedico a mis padres Darío Hernández A. y Lilia Tamayo G. quienes con su esfuerzo, amor y dedicación me han guiado durante todo este tiempo y a quienes en gran parte pertenece este logro, a mis abuelos quienes estarían orgullos de verme en esta etapa, a mis hermanos que son parte fundamental de mi vida y la inspiración para haber llegado a este punto.

José Elías Hernández Tamayo

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi familia, por su amor y apoyo incondicional; a mis padres, por enseñarme que no hay meta imposible; a mis amigos, por su comprensión y ánimos constantes; y a mis profesores y tutor, por su guía y conocimientos. A mi equipo de trabajo, por su compromiso y esfuerzo; y a todas las personas que creyeron en mí y me impulsaron a seguir adelante. A Dios, por darme la fuerza para superar cada obstáculo y por rodearme de personas maravillosas.

Abner Javier Martínez Ramírez

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al tutor del proyecto el M. Sc. Francisco Argüello por su guía en el desarrollo de este proyecto, al M. Sc. Carlos Cuenca a cargo del laboratorio de Mecánica Sólidos, las ingenieras Stephany Adrian y Angie Mendoza a cargo del laboratorio de plásticos, y a todos mis profesores de la carrera de Ingeniería en materiales por aportan en mi formación académica.

José Elías Hernández Tamayo

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la fortaleza y sabiduría necesarias para llevar a cabo este proyecto. A la empresa, por confiar en jóvenes estudiantes y darnos la valiosa oportunidad de aplicar nuestros conocimientos en un entorno profesional. A mis profesores y a mi tutor, el M. Sc. Francisco Argüello, por su constante orientación y apoyo durante todo el proceso. Extiendo mi especial gratitud al laboratorio de Procesamiento de Plásticos, dirigido por el Ph. D. Andrés Rigail, y al laboratorio de Mecánica de Sólidos, bajo la dirección del M. Sc. Carlos Cuenca, por su invaluable colaboración y por proporcionar los recursos necesarios para la realización de los ensayos que permitieron el desarrollo de este trabajo.

Abner Javier Martínez Ramírez

Declaración Expresa

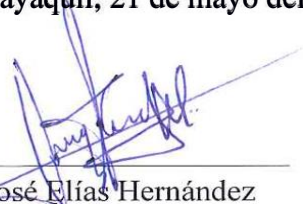
Nosotros José Elías Hernández Tamayo y Abner Javier Martínez Ramírez acuerdo/acordamos y reconocemos que:

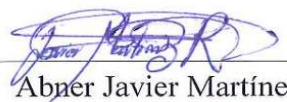
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 21 de mayo del 2024.


José Elías Hernández
Tamayo


Abner Javier Martínez
Ramírez

Evaluadores

David Reyes Ortiz, M. Phil.

Profesor de Materia

Francisco Argüello Sanipatín, M. Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

Una empresa en Guayaquil enfrenta problemas en su línea de producción de galletas debido al sellado defectuoso de empaques tubulares de BOPP-met, generando pérdidas de alrededor de \$24.000 por lote de producción. Este proyecto busca optimizar el proceso de sellado en dichos empaques para reducir productos no conformes debido a fallas en sello. Se llevaron a cabo ensayos de tracción y calorimetría diferencial de barrido (DSC) para validar las propiedades termomecánicas de la materia prima. Como resultado, se observó diferencias estadísticamente significativas en las propiedades térmicas y mecánicas. Adicionalmente, para evaluar la calidad del sello, se realizó una curva de sellado utilizando la fuerza de sello como parámetro. Siguiendo la norma JIS Z0238, los resultados indicaron que el rango óptimo de temperatura de trabajo se encuentra entre 136 y 139 °C. Finalmente, el costo del proyecto equivale al 14% de las pérdidas generadas por el problema de sellado, lo que justifica su implementación para mejorar la eficiencia y reducir costos.

Palabras Clave: materia prima, sellado, dsc, tracción, curva de sellado.

Abstract

A company in Guayaquil is struggling with defective seals on BOPP-met tubular packaging in its cookie production line, resulting in losses of about \$24.000 per batch. This project aims to optimize the sealing process to reduce the number of defective products caused by seal failures. Tensile tests and differential scanning calorimetry (DSC) were performed to analyze the thermomechanical properties of the raw material, revealing variations in both thermal and mechanical characteristics. A sealing curve was established, identifying an optimal temperature range between 136 and 139°C. Seal quality was assessed by measuring the force needed to break the seal, following the JIS Z0238 standard. Additionally, the project investment represents just 14% of the losses caused by the sealing issue, making it a cost-effective solution to improve efficiency and cut costs.

Keywords: raw material, sealing, dsc, tensile testing, sealing curve

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Capítulo 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Polipropileno.	3
1.4.2 Termosellado de BOPP	4
1.4.3 Técnicas de Caracterización.....	9
Capítulo 2	11
2. Metodología.	12

2.1	Diseño conceptual.....	12
2.1.1	Requerimientos y restricciones de diseño	12
2.1.2	Factores de influencia.....	13
2.1.3	Evaluación de alternativas.....	14
2.2	Procedimiento experimental	15
2.2.1	Evaluación de propiedades térmicas y mecánicas.....	16
2.2.2	Curva de sellado	19
Capítulo 3		22
3.	Resultados y análisis	23
3.1	DSC	23
3.2	Tracción BOPP-met.....	28
3.3	Curva de Sellado.....	32
3.4	Análisis económico.....	34
Capítulo 4		36
4.1	Conclusiones y recomendaciones	37
4.1.1	Conclusiones	37
4.1.2	Recomendaciones.....	38

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
BOPP	Polipropileno biorientado
BOPP-met	Polipropileno biorientado metalizado
JIS	Japanese Industrial Standart
ISO	International Organization for Standardization
DSC	Differential Scanning Calorimetry
PVC	Polyvinyl chloride
PP	Polipropileno
HSS	Heat Seal Strength

Simbología

Al	Aluminio
Cu	Cobre
In	Pulgada
m	Metro
mm	Milímetro
mL	Mililitro
mg	Miligramo
g	Gramo
MPa	Mega Pascales
°C	Grados Celsius
μm	Micrómetro
N	Newton
T _f	Temperatura de fusión

Índice de figuras

Figura 1.1 Estructura del BOPP-met analizado	4
Figura 1.2 Comportamiento de las cadenas poliméricas antes y después de la adhesión molecular al aplicar temperatura	5
Figura 1.3 Representación del proceso de termosellado y el comportamiento de la temperatura en la superficie de sello vs el tiempo de prensado	6
Figura 1.4 Gráfico de contorno de HSS a presión constante de 3.1 bar.....	9
Figura 1.5 DSC del BOPP metalizado a una tasa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$	10
Figura 2.1 Representación de las secciones tomadas por cada bobina de BOPP-met	16
Figura 2.2 Dimensiones de probetas para películas plásticas en ensayos de tracción	17
Figura 2.3 Medición de espesores del BOPP-met.....	18
Figura 2.4 Papel Fuji Prescale.....	19
Figura 2.5 Dimensiones de probetas para ensayos de resistencia del sello.....	20
Figura 2.6 Ensayo de tracción para el sello del empaque.	21
Figura 3.1 Gráficos (a) BOPP0204, (b) BOPP0304, (c) BOPP0404	24
Figura 3.2 Gráficos (a) BOPP0204, (b) BOPP0304, (c) BOPP0404	25
Figura 3.3 Comportamiento de Tf , en la distintas secciones y bobinas.	26
Figura 3.4 Gráfico de dispersión del esfuerzo máximo de todas las muestras.....	29
Figura 3.5 Comportamiento de esfuerzo máximo en la distintas secciones y bobinas.	30
Figura 3.6 Curva de sellado, fuerza en función de la temperatura.....	34

Índice de tablas

Tabla 2.1 Requerimientos generales	12
Tabla 2.2 Restricciones por considerar	13
Tabla 2.3 Criterios con sus respectivas ponderaciones.	14
Tabla 2.4 Resultados de selección de las alternativas para el desarrollo de la metodología	15
Tabla 2.5 Condiciones de operación para ensayo de tracción.....	17
Tabla 2.6 Condiciones de ensayo para DSC	18
Tabla 2.7 Parámetros para el ensayo de tracción	20
Tabla 3.1 Resumen de las temperaturas de fusión obtenidas en el DSC.....	27
Tabla 3.2 Datos importantes del análisis ANOVA	28
Tabla 3.3 Datos del espesor tomados para secciones y bobinas	28
Tabla 3.4 Datos experimentales del esfuerzo máximo de cada muestra.....	31
Tabla 3.5 Datos importantes del análisis ANOVA	31
Tabla 3.6 Precios actuales de ensayos requeridos.....	34
Tabla 3.7 Perdidas por termosellado deficiente.	35

Capítulo 1

1. Introducción

En el mercado mundial se usan varios tipos de empaques para galletas, entre los más utilizados se encuentra el polipropileno biorientado (BOPP). Esta materia prima, constituida por polipropileno (PP), tiene mejores propiedades de barrera y resistencia mecánica con respecto a otras materias primas, como el polietileno y el PVC. El BOPP ofrece mayor transparencia, brillo y capacidad de impresión, así que es una opción ideal para elaborar empaques flexibles en el sector alimenticio, especialmente en galletas[1].

Dentro del proceso de envasado con empaques flexibles de BOPP, la etapa final es el proceso de sellado, la cual se realiza mediante aplicación de calor, proceso conocido como termosellado, que es fundamental en la producción de galletas debido a que aseguran la hermeticidad del producto protegiéndolo de agentes externos como la humedad, el oxígeno y agentes patógenos [1]. Un sellado defectuoso además de comprometer la calidad y seguridad del producto aumenta los costos de producción debido a la necesidad de reprocesar o desechar el producto no conforme [2].

La calidad de termosellado utilizando BOPP depende de múltiples factores, entre ellos la materia prima, las condiciones del proceso de sellado y la configuración de los equipos utilizados [3].

Este proyecto tiene como objetivo optimizar una línea de producción de galletas mediante la mejora del proceso de sellado de empaques flexibles para reducir la cantidad de productos no conformes. La identificación y corrección de este problema es esencial para garantizar la seguridad alimentaria y mantener la competitividad del producto en el mercado.

1.1 Descripción del problema

Una empresa con sede en la ciudad de Guayaquil, especializada en la fabricación de galletas, tiene problemas con sus empaques de galletas tubulares, los cuales presentan defectos en el sello.

En los últimos meses, los defectos recurrentes en el sellado han tenido un impacto negativo en la empresa. La consecuencia directa más preocupante de estos fallos en el sellado es la contaminación patógena, por lo cual es crucial abordar este problema de manera urgente para salvaguardar la calidad y la reputación de los productos.

1.2 Justificación del problema

La empresa necesita abordar el problema de los defectos en el sellado de los empaques para galletas tubulares, ya que, en el 2023, representaron una pérdida económica de \$24.807,61 debido al bloqueo aproximado de 28 pallets de producto terminado y a la reprogramación de las actividades de 129 operadores cuyas labores tuvieron que destinarse al tratamiento del producto no conforme, lo que equivale a 21 horas de paro de línea. Esto resulta en un incremento de los gastos operativos y tiene un impacto negativo en la eficiencia de la línea de producción.

1.3 Objetivos

A continuación, se describen el objetivo general y los objetivos específicos del presente proyecto.

1.3.1 *Objetivo general*

Optimizar una línea de producción de galletas mediante la mejora del proceso de sellado de empaques flexibles para reducir la cantidad de productos no conformes.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- a. Comparar las propiedades termomecánicas del material utilizado en empaques flexibles para verificar que no exista una variación significativa entre muestras y valores estándar.
- b. Crear una curva de sellado mediante un diseño experimental adecuado para determinar los parámetros de operación de la máquina que aseguren la calidad del sello.

1.4 Marco teórico

En esta sección se presentan las consideraciones técnicas e investigaciones previas sobre el proceso de termosellado.

1.4.1 *Polipropileno.*

El PP es un polímero termoplástico, que puede deformarse y moldearse repetidas veces a altas temperaturas entre 180 a 280° C. Este material se obtiene a partir del propileno y generalmente se comercializa como homopolímero (un solo monómero) o copolímero (dos o más tipos de monómeros como propileno y etileno) [4].

Entre los varios tipos del PP se encuentra polipropileno biorientado o BOPP por sus siglas en inglés. Este polímero se fabrica por medio de la fundición del PP para generar una película mediante extrusión y soplado, posteriormente es estirada por una serie de rodillos en sentido longitudinal y transversal, dándole la biorientación. Esta orientación hace referencia a la alteración mecánica y realineación de la microestructura del polipropileno [4].

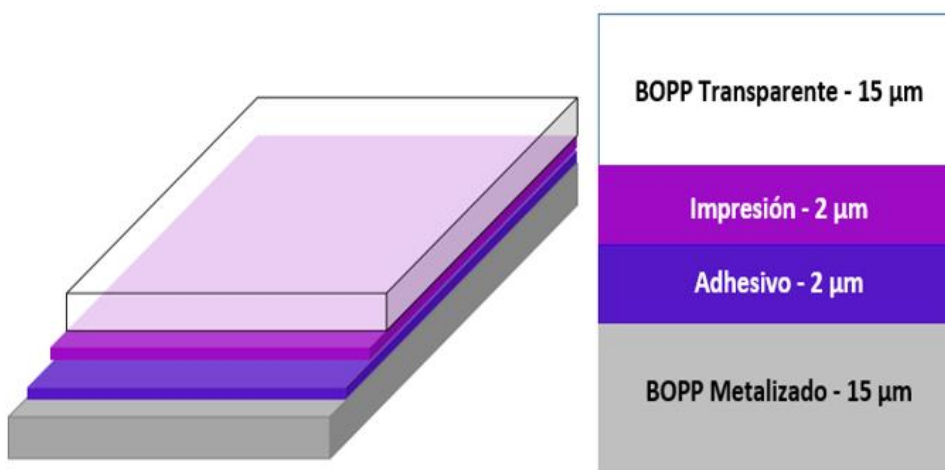
Posterior al proceso de biorientación, se puede agregar una capa metálica de aluminio (Al) en la superficie de la película del PP, el Al en forma de alambre es calentado en una cámara de vacío hasta evaporarlo permitiéndole adherirse a la superficie del BOPP y creando una capa

metálica [4], este tipo de material es denominado polipropileno biorientado metalizado (BOPP-met).

Al BOPP-met se le agregan capas adicionales hasta formar el empaque alimentario. En la figura 1.1 se puede observar un esquema de un material de empaque completo, con todas las capas, generalmente para empaque de galleta [4]. Este se constituye de una capa base de BOPP-met por una de sus caras, en conjunto con una capa de adhesivo, una capa de impresión y una capa externa de BOPP transparente a manera de sándwich.

Figura 1.1

Estructura del BOPP-met analizado.



Las capas externas de BOPP se aprovechan para generar el sello, ya que se puede utilizar para sellar con temperaturas relativamente bajas, a este proceso se le denomina termosellado [4].

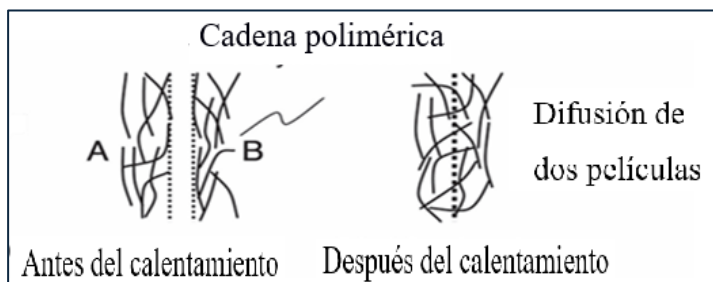
1.4.2 Termosellado de BOPP

El término termosellado se refiere al proceso de sellado de materiales mediante calor sin la necesidad de adhesivos externos, esto sucede por el mecanismo de adhesión intermolecular representada en la figura 1.2. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas próximas a la temperatura de fusión (T_f) del material con el cual se va a crear el sello, aplicando presión para asegurar el contacto entre superficies durante un tiempo adecuado.

El proceso de termosellado depende de una configuración precisa de los parámetros de operación, como la temperatura, el tiempo de sellado y la presión aplicada. Un ajuste incorrecto de estos parámetros puede comprometer la calidad del sellado y, en consecuencia, la integridad del producto. Por lo tanto, el termosellado es ampliamente utilizado en la industria alimentaria, ya que facilita la producción a gran escala y proporciona una protección adecuada para los productos contenidos en los envases sellados [2].

Figura 1.2

Comportamiento de las cadenas poliméricas antes y después de la adhesión molecular al aplicar temperatura.



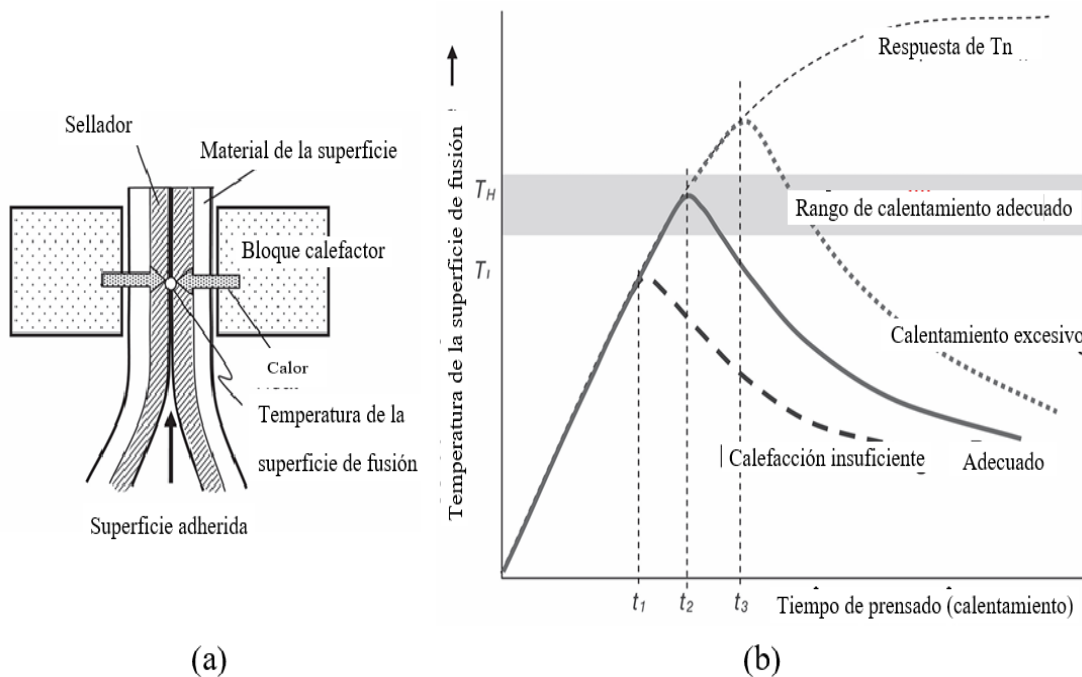
Nota. Fuente [2].

Para realizar el termosellado, se utiliza una prensa térmica equipada con una mordaza metálica caliente que aplica presión sobre las películas de BOPP. El calor generado por la mordaza se transfiere a las películas plásticas, provocando que las superficies en contacto se adhieran entre sí, como se ilustra en la Figura 1.3 (a) [3].

La temperatura utilizada en el proceso de termosellado debe ser tan alta como para adherir las superficies termoplásticas y permitir que se fusionen correctamente, pero sin degradar los materiales. Por lo general, las temperaturas de sellado de empaques para alimentos oscilan entre 120 y 200°C, dependiendo de los tipos de materiales termoplásticos y del diseño del envase [3].

Figura 1.3

Representación del proceso de termosellado y el comportamiento de la temperatura en la superficie de sello vs el tiempo de prensado.



Nota: La Figura 1.3 (a) ilustra un esquema del sistema durante el proceso de sellado. La Figura 1.3 (b) muestra un gráfico de la respuesta típica de la temperatura de la superficie de fusión en función del tiempo de sellado en el termosellado [1].

Uno de los problemas más comunes en el sellado es la dificultad para controlar la temperatura de la superficie de fusión debido a la distribución no uniforme del calor a lo largo de la mordaza, esto causa sobrecalentamiento. En la Figura 1.3 (b) se muestra la relación entre los factores que determinan un buen sellado del material, la temperatura que se debe alcanzar entre superficies para fusionarse y el tiempo de prensado que se necesita para lograrlo. Si el tiempo de prensado de la maquina es bajo (t_2), la transferencia de calor desde el bloque calefactor hacia el material no permitirá conseguir la temperatura de calentamiento adecuado; de esta misma forma, si es excedido (t_3), ocurre un calentamiento excesivo, dejando a t_2 como el tiempo idóneo donde sucede un rango de calentamiento adecuado. [1]

Los parámetros más importantes para el proceso de termosellado son la calidad de la materia prima, y los parámetros del proceso en la máquina de termosellado: temperatura, tiempo y presión [6].

La temperatura afecta tanto la calidad del sellado como la eficiencia del proceso. En primer lugar, determina la viscosidad del sellante reblandecido, lo que influye en su capacidad para fluir y llenar los espacios entre las superficies a unir. Una temperatura inferior puede resultar en un sellado incompleto o inadecuado. Por otro lado, un aumento excesivo de la temperatura puede provocar la degradación del material, lo que compromete la integridad del empaque [5]. Además, la temperatura a la que se reblandece el material también afecta a la velocidad con que se adhieren las capas de BOPP-met, si la materia prima no presenta propiedades térmicas homogéneas, se tendrán defectos de adhesión entre las superficies.

Por otra parte, el tiempo influye en el aumento del área sellada, permitiendo que el BOPP alcance la temperatura necesaria para producirse la adhesión. No obstante, debido a que el tiempo de procesamiento impacta los costos, es crucial determinar el tiempo mínimo necesario para el sellado [5].

Dentro del rango óptimo de temperatura, la resistencia del sello aumenta con el tiempo en el que permanecen en contacto las mordazas con el material, a esto se le conoce como tiempo de permanencia. Investigaciones indican una relación entre la resistencia del sello y la raíz cuadrada del tiempo, con una pendiente mayor a temperaturas más altas, lo que permite alcanzar la resistencia máxima del sello rápidamente. Sin embargo, un modelo empírico sugiere que la temperatura para alcanzar la máxima resistencia del sello en pruebas de adherencia en caliente disminuye con un mayor tiempo de permanencia [5].

En lo que respecta a la presión, algunos estudios indican que incrementar la presión de sellado por encima del nivel necesario para asegurar un contacto completo entre las capas no

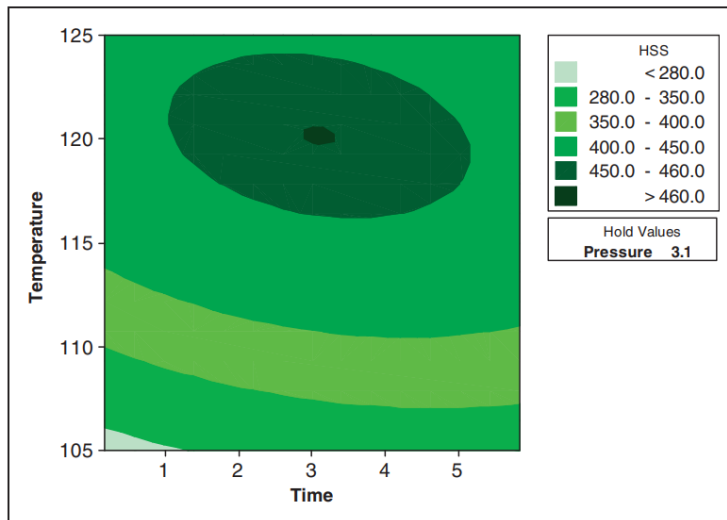
afecta significativamente la resistencia del sellado. Aumentar la presión desde niveles muy bajos, como de 0.1 a 0.5 N/mm², mejora el contacto entre las capas y reduce la temperatura de inicio del sellado, pero más allá de ese nivel, no hay cambios debido a la disminución del volumen libre bajo compresión [5].

La calidad del sellado (experimental) se evalúa en la resistencia del termosellado (HSS) que es la carga máxima que soporta el sello antes de abrirse. Según Aiyengar y Divecha [6], la resistencia más baja del termosellado, que se mide en gramos con respecto del ancho de la muestra o probeta (HSS-g/in) se obtiene a baja temperatura y tiempo de permanencia mínimo, mientras que, a altas temperaturas y tiempos más prolongados, se obtienen mejores resultados. A partir de lo mencionado, se puede concluir que la presión no es un parámetro relevante para maximizar el HSS, esto se cumple a partir del punto en el cual la presión sea suficiente para que las barras selladoras entren en contacto uniforme. Se debe considerar que las variaciones entre tiempo y temperatura influyen de manera más drástica en la calidad del sello [6].

Por medio del gráfico de contorno en la figura 1.4 se muestra que manteniendo la presión a 3.1 bar, podemos obtener un HSS de entre 450-460 g/in que garantiza un buen sello si se maneja tiempos mayores a 1 s y menores a 5 s, con temperaturas entre 115 y 125 °C [6]. Con base en base a la norma JIS Z0238 es necesario un HSS min de 500g/in (3N/15mm) para aplicaciones de sellos de fácil apertura

Figura 1.4

Gráfico de contorno de HSS a presión constante de 3.1 bar.



Nota: Fuente [6] un sello pelable tiene un HSS de entre 450-460 g/in.

1.4.3 Técnicas de Caracterización.

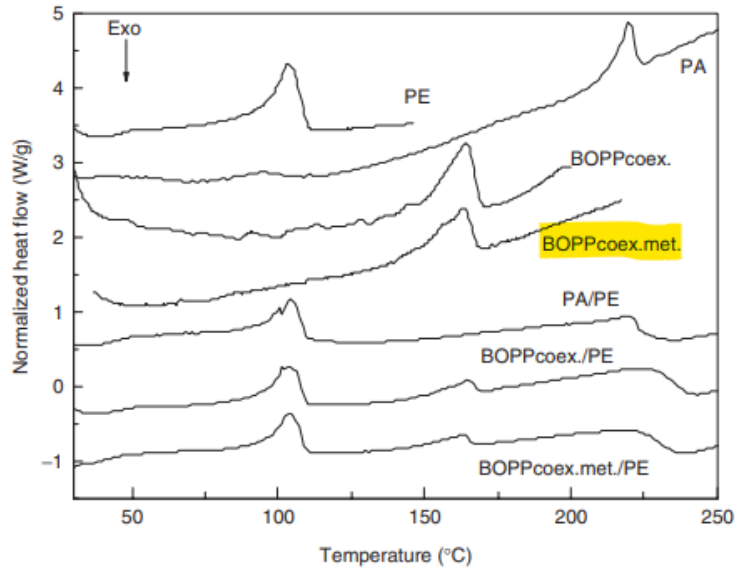
Dentro de las técnicas de caracterización usadas para películas plásticas se utilizó calorimetría diferencial de barrido (DSC) para el análisis de las propiedades térmicas y ensayo de tracción para evaluar las propiedades mecánicas.

El DSC es una técnica utilizada para medir las propiedades térmicas, donde se identifican las temperaturas en las cuales suceden cambios termodinámicos en el material, como la fusión o cristalización.

En la figura 1.5 se presentan distintos DSC para varios tipos de BOPP utilizados generalmente en la industria de los alimentos. Es de particular interés la curva resaltada con color amarillo ya que este material es similar al utilizado para sellar los empaques de galletas que se analizarán en el presente trabajo. Según la figura 1.5, se puede esperar que los ensayos térmicos de la materia prima tengan un pico en el rango de 130 a 168 °C, ya que este pico corresponde exclusivamente a la fusión de las zonas cristalinas del PP [7].

Figura 1.5

DSC del BOPP metalizado a una tasa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$.



Nota: Fuente [7]

El ensayo de tracción se utiliza en la evaluación de las propiedades mecánicas del material, que permite obtener datos como la resistencia a la tracción, donde se indica la carga máxima soportada vs la deformación antes de llegar el fallo. Existen normativas como ASTM F88, o JIS Z0238 que se encargan de determinar los parámetros de operación en función del tipo y forma del material a ensayar.

Capítulo 2

2. Metodología.

En esta sección se detalla el procedimiento de diseño para la optimización del proceso de sellado en empaques flexibles.

2.1 Diseño conceptual

A continuación, se presentan los requerimientos y restricciones, factores determinantes y alternativas de diseño.

2.1.1 *Requerimientos y restricciones de diseño*

Con base en la información proporcionada por el cliente se plantearon dos objetivos para dar solución al problema. Estos objetivos están correlacionados de forma que el alcance del primero da apertura a continuar con el desarrollo del segundo. Los requerimientos se encuentran presentados en la tabla 2.1. Las restricciones que se hallaron al inicio y a medida que se desarrolló el proyecto se presenta en la tabla 2.2.

Tabla 2.1

Requerimientos generales.

Requerimientos	Objetivo de diseño
Validación	Validación de materia prima utilizada para el proceso de termosellado.
Curva de Sellado	Gráfico que asegure la calidad del sellado.

Para asegurar la efectividad de la solución propuesta, es fundamental realizar la validación de la materia prima utilizada en el proceso de sellado. Esta validación implica analizar propiedades mecánicas y térmicas del material para garantizar que el sellado se dé correctamente. Además, se debe desarrollar una curva de sellado, la cual detalla la relación entre la temperatura y la resistencia del sello. Esta curva permite identificar los ajustes óptimos de temperatura para maximizar la calidad del sellado y minimizar los costos.

Tabla 2.2*Restricciones por considerar.*

Restricciones	
Velocidad	Por motivos de productividad el parámetro de velocidad no puede variar.
Presión	Dificultad para obtener una medición precisa.

Al implementar los parámetros de sellado optimizados, es necesario considerar ciertas restricciones operativas clave. En primer lugar, la velocidad de la línea de producción no puede ser modificada, ya que es un indicador crítico de la capacidad de producción. Alterar la velocidad podría afectar negativamente el volumen de producción y, por ende, la eficiencia operativa de la empresa. Además, la presión aplicada durante el proceso de sellado como se mencionó en la sección 1.4.2 no es un factor determinante, siempre y cuando el contacto entre mordazas ocurra de manera uniforme. Por ende, la velocidad como la presión deben mantenerse constantes para asegurar un proceso de sellado estable y eficiente dentro de estos límites operativos.

2.1.2 Factores de influencia

Para evaluar las alternativas mencionadas anteriormente, se consideraron ciertos factores que ayudarían a determinar la mejor solución posible. Estos factores son cruciales para asegurar que la decisión tomada sea la más beneficiosa para la empresa, tanto en términos de eficiencia como de costo. Por ende, los factores considerados fueron:

- a. **Factibilidad:** este criterio se refiere a la facilidad con la que se puede implementar la solución. Se evaluó cuán accesible y manejable es la solución en el entorno operativo actual, considerando la infraestructura, habilidades del personal y compatibilidad con los procesos existentes. La facilidad de implementación es fundamental para minimizar interrupciones y asegurar una transición suave hacia la nueva solución.

- b. Costo: Este criterio prioriza las soluciones que tienen un menor costo de aplicación. Se consideran los costos asociados, adquisición de materiales, equipos, implementación entre otros. El costo es un factor importante y afecta directamente a la rentabilidad del proyecto.
- c. Tiempo: Este criterio mide el tiempo necesario para implementar la solución en su totalidad. Incluye la fase de pruebas, ajustes y puesta en marcha hasta que la solución esté operativa y funcionando según lo esperado.

En la tabla 2.3, mediante una matriz de decisión, se detalla los factores mencionados junto con sus respectivos pesos. Después de un análisis exhaustivo, se determinó que los factores más relevantes para nuestra evaluación son la factibilidad, el costo y tiempo.

Tabla 2.3

Criterios con sus respectivas ponderaciones.

Criterio	Factibilidad>>Costo>>Tiempo			$\Sigma+1$	Ponderación
	Factibilidad	Costo	Tiempo		
Factibilidad		1	1	3	0,50
Costo	0		1	2	0,33
Tiempo	0	0		1	0,17
	TOTAL			6	1

2.1.3 Evaluación de alternativas.

Con base en referencias bibliográficas se encontraron diferentes formas para mejorar un proceso de termosellado, entre ellas están; optimización de parámetros de sellado[8], uso de materiales de mejor calidad[9], implementación de sellado por ultrasonido[10] y control de calidad automatizado[11].

Los parámetros de ponderación se establecieron y se evaluaron para cada una de las soluciones propuestas: S1 (optimización de parámetros de sellado), S2 (uso de materiales de

mejor calidad), S3 (Implementación de tecnología de sellado por ultrasonido), S4 (Sistema de control de calidad automatizado). La evaluación, basada en los criterios antes mencionados, resultó en la selección de S1. Esta opción se destacó por su balance óptimo entre facilidad de implementación, costo efectivo y tiempo razonable de aplicación. Los resultados se evidencian en la tabla 2.4.

Tabla 2.4

Resultados de selección de las alternativas para el desarrollo de la metodología.

Resultados de alternativas				
Alternativas	Factibilidad	Costo	Tiempo	Σ
S1	0,20	0,13	0,07	0,40
S2	0,15	0,10	0,05	0,30
S3	0,07	0,03	0,02	0,13
S4	0,07	0,07	0,02	0,17

Se obtuvo S1 como la solución con el mayor porcentaje, alcanzando un 40%, seguida de S2 con un 30%. Dado que la diferencia entre ambas soluciones es del 10%, se consideró importante la materia prima en el establecimiento de parámetros en el proceso de termosellado. Por este motivo, se realizó una caracterización para descartar diferencias significativas en la materia prima utilizada por la empresa para el sellado, con el fin de garantizar que los problemas de sellado no deriven de fluctuaciones en las características de la materia prima.

2.2 Procedimiento experimental

En esta sección se detalla la preparación de muestras para los ensayos de tracción de la película y el sello, además de las muestras para calorimetría diferencial de barrido. Estos procedimientos ayudaron a caracterizar la materia prima y posteriormente elaborar la curva de sellado.

2.2.1 Evaluación de propiedades térmicas y mecánicas.

Para un correcto termosellado es fundamental evaluar la calidad de la materia prima con la que se trabaja, por ende, inicialmente se realizó la evaluación de las propiedades tanto térmicas como mecánicas del BOPP-met mediante ensayos de DSC y tracción.

La empresa recibe el BOPP-met en forma de rollos, a estos rollos se le denomina bobinas y tienen un peso de 12 kg cada uno. En la selección del laminado BOPP-met, se trabajó mediante el muestreo de bobinas por secciones, es decir, se tomaron muestras de la sección del inicio, del medio y del final de cada bobina. Para esto, se seleccionaron 3 bobinas del mismo proveedor, con diferentes fechas de almacenamiento.

La nomenclatura utilizada para nombrar a cada una de las bobinas fue la siguiente: BOPP0204, BOPP0404 y BOPP0304. Para los ensayos térmicos se añadieron las letras "i", "m" y "f" para identificar las secciones inicial, media y final de cada bobina, respectivamente. En la figura 2.1 se puede observar una imagen de las bobinas de BOPP-met muestreadas en conjunto con una representación gráfica del muestreo realizado.

Figura 2.1

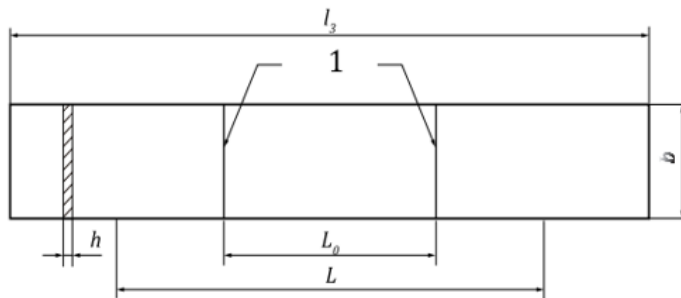
Representación de las secciones tomadas por cada bobina de BOPP-met.



Para el ensayo de tracción se utilizaron probetas como las de la figura 2.2. Las dimensiones de la probeta se establecieron según la norma ASTM-D882 y los parámetros de operación del equipo se seleccionaron según la norma ISO 527-3;2018(E)[12] presentados en la tabla 2.5. Estos ensayos fueron realizados en una máquina de ensayos universal de la marca SHIMADZU en el laboratorio de mecánica de sólidos de ESPOL. Para cada sección se realizaron 3 repeticiones, analizando un total de 27 probetas.

Figura 2.2

Dimensiones de probetas para películas plásticas en ensayos de tracción.



Dimensiones	Valor	Unidades	Norma
b	25	mm	ISO 527-3
l3	150	mm	
l	100	mm	
h	34	um	

Nota: fuente [12]

Tabla 2.5

Condiciones de operación para ensayo de tracción.

Parámetros	Valor	Unidades	Norma
Velocidad	10	mm/min	ASTM D882
Distancia inicial	100	mm	
Temperatura	23	°C	

Nota: Parámetros referenciales establecidos para producir resultados repetitivos [13].

Para el posterior cálculo de los esfuerzos soportados por el BOPP-met se midieron los espesores de cada probeta con un micrómetro en el laboratorio de evaluación de materiales (LEMAT), antes de ser sometidos a tracción, como se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.3

Medición de espesores del BOPP-met.



El ensayo térmico DSC se realizó en un equipo TA instruments Q200-1689 en el laboratorio de plásticos en ESPOL. Se analizaron un total de 9 muestras, 1 muestra por cada sección de cada bobina. Para realizar el ensayo se tomaron entre 8 a 10 mg, de cada muestra, posteriormente se las colocó en un crisol de aluminio y se establecieron las condiciones del equipo según lo descrito en la tabla 2.6.

Tabla 2.6

Condiciones de ensayo para DSC.

Parámetros	Valor	Unidades
Flujo N_2	20	mL/min
Temperatura	23-200	°C
Rampa	5	°C/min
Masa	8-10	mg

2.2.2 *Curva de sellado*

Para la obtención de la curva de sellado se trabajó con las mordazas que se usan en la línea de producción, variando la temperatura de las mordazas en 8 puntos específicos, en un rango de 121 a 142 °C. La selección del rango de temperatura se realizó con base en la información proporcionada sobre el funcionamiento de la línea de producción y tomando en consideración las temperaturas de fusión obtenidas con el DSC, en intervalos de 3 °C, sin modificar la velocidad de la máquina establecida por la empresa. Se tomaron aleatoriamente 3 empaques por cada punto de temperatura establecido para el posterior análisis de la resistencia mecánica del sellado.

El tiempo de permanencia estaba relacionado con la velocidad de producción de la maquina en unidades paquetes por minuto (paquetes/ min), este parámetro estaba definido en 85 paquetes/min. lo que es equivalente a un tiempo de permanencia aproximado de 0,7 s.

Para la presión se utilizó un papel Fuji Prescale que permite calibrar la presión de las mordazas de forma cualitativa. Al colocar este papel entre las mordazas se genera una huella que debe ser homogénea, si la presión es uniforme la marca en el papel tendrá una misma tonalidad. Adicionalmente la intensidad de la huella permite mantener un estándar de la presión de operación[14]. En la figura 2.4 se presenta un ejemplo del funcionamiento del método utilizado para calibrar la presión.

Figura 2.4

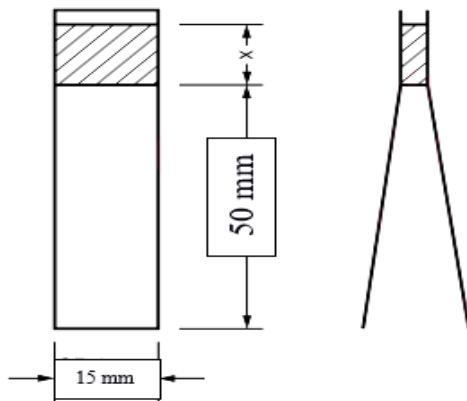
Papel Fuji Prescale.



Esta selección permite un análisis detallado de la relación entre la temperatura de sellado y la integridad del empaque, de forma que los ajustes optimizados mejoren consistentemente la calidad del sello. La resistencia al sello se evaluó mediante ensayo de tracción bajo la normativa JIS Z0238[15]. Las dimensiones aplicables para las probetas se encuentran detalladas en la figura 2.5. Los parámetros empleados para realizar el ensayo de tracción del sellado se presentan en la tabla 2.7.

Figura 2.5

Dimensiones de probetas para ensayos de resistencia del sello.



Nota: la sección rayada indica el área que ocupa el sello la cual no es específica, y el ancho de la probeta en la práctica fue de 15 mm en base a la norma JISZ0238, Fuente [16].

Tabla 2.7

Parámetros para el ensayo de tracción.

Parámetros	Valor	Unidades	Norma
Velocidad	10	mm/min	ASTM F88 F2029-16
Distancia inicial	100	mm	
Temperatura	23	°C	

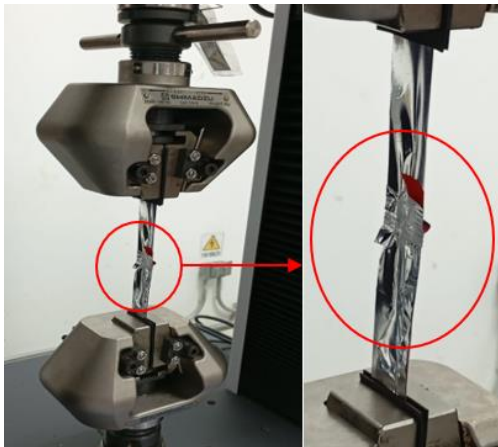
Nota: Parámetros referenciales establecidos para producir resultados repetitivos [16], [17].

El ensayo de tracción del sello (ver figura 2.6) entrega una curva que relación la fuerza con el desplazamiento, los datos de fuerza que forman esta curva se promedian, el promedio se calcula tomando en cuenta el 80% de la curva, seleccionando los valores de fuerza que están

entre el 10% y el 90% de todos los valores registrados, tal como lo establece la norma ASTM F88. Este enfoque busca obtener un promedio representativo de la resistencia del sello a través de diferentes niveles de desplazamiento del sello y fuerza aplicada [13].

Figura 2.6

Ensayo de tracción para el sello del empaque.



Capítulo 3

3. Resultados y análisis

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos térmicos y mecánicos para evaluar el comportamiento de la T_f y esfuerzo máximo (σ_{Max}) o punto de rotura. Además, se elaboró una curva de sellado donde se observó el comportamiento de la fuerza de sello en función de la temperatura para determinar un intervalo óptimo de trabajo.

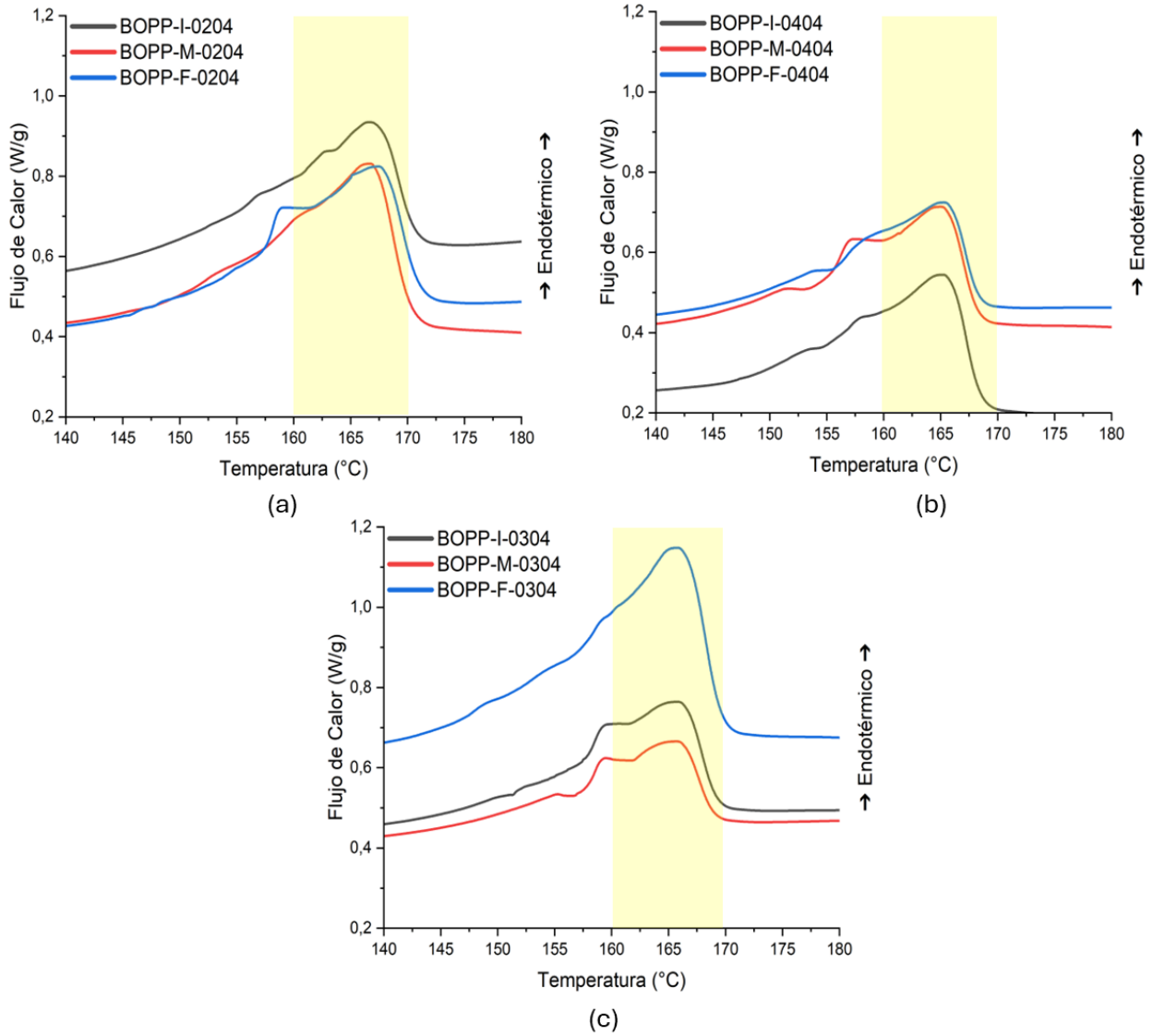
3.1 DSC

La figura 3.1 presenta el comportamiento térmico de las tres secciones para cada bobina. En todos los gráficos se observa al menos un pico endotérmico debido a los procesos de fusión de las fases cristalinas del polipropileno en el BOPP-met. Los picos comienzan a formarse a partir de los 140 °C alcanzan un máximo en el rango de 160 a 170 °C lo que coincide con lo esperado para el PP.

Adicionalmente, se puede observar que en algunos casos se obtuvo más de un pico. Por ejemplo, en las curvas BOPP-F-0204, BOPP-M-0404, BOPP-M-0304 y BOPP-F-0304. Este comportamiento podría estar relacionado con el proceso de biorientación aplicado al PP, el cual puede inducir una recrystalización en la estructura del polímero, creando zonas con diferentes niveles de orden cristalino [18]. Esta recrystalización puede resultar en la aparición de múltiples picos en los termogramas debido a la variabilidad en la distribución de las fases cristalinas y amorfas. La superposición de estos picos puede dificultar su identificación especialmente cuando se usan rampas de calentamiento relativamente rápidas, como la de 5 °C/min utilizado en este análisis. Esta velocidad de calentamiento puede provocar la fusión simultánea de diferentes fracciones cristalinas, lo que ocasiona que los picos adicionales se superpongan al principal, generando una interpretación más compleja de los datos obtenidos. Por tanto, estos picos adicionales reflejan una complejidad estructural del material que está influenciada tanto por el proceso de manufactura como por las condiciones de análisis térmico.

Figura 3.1

Gráficos (a) BOPP0204, (b) BOPP0304, (c) BOPP0404.

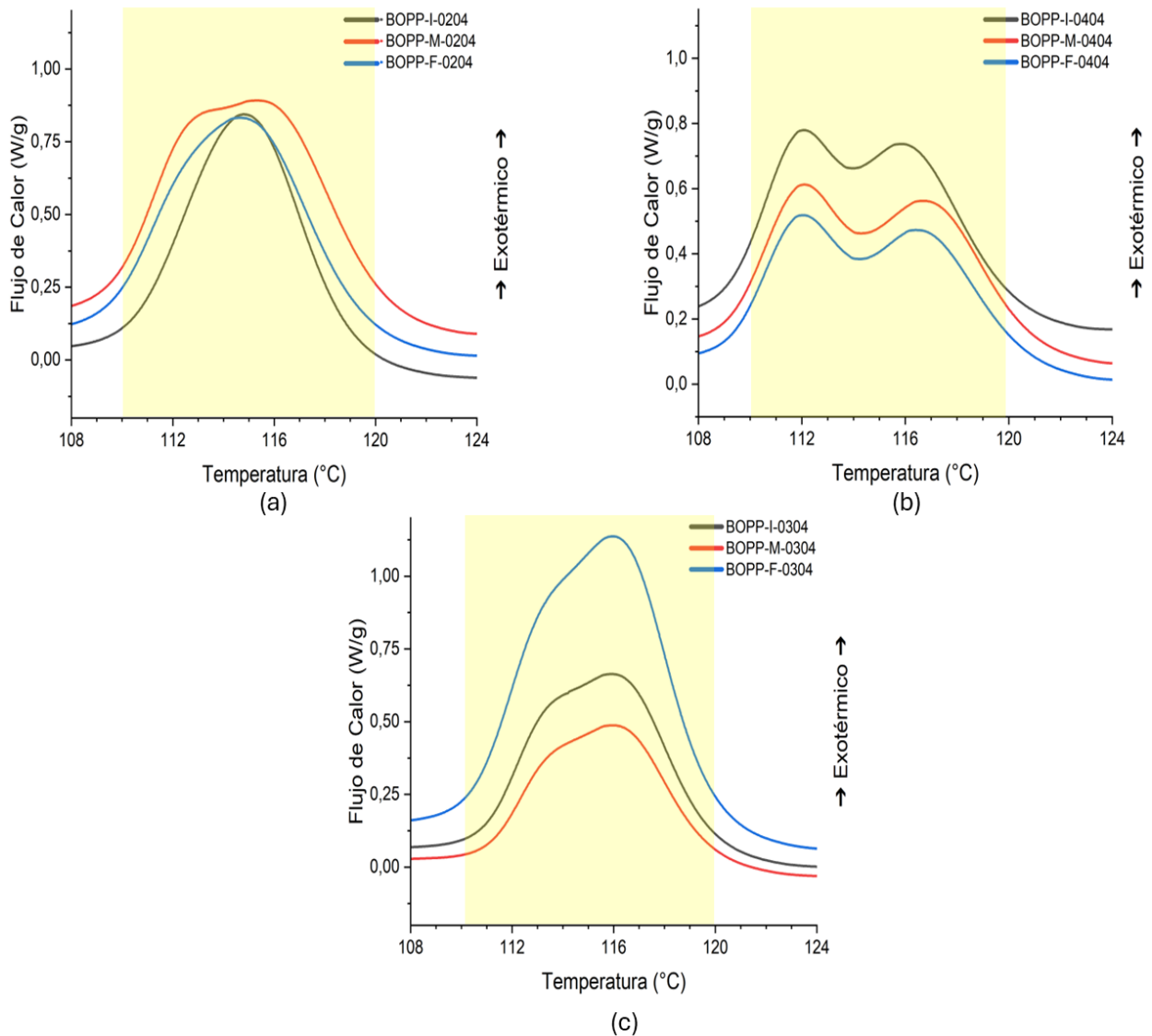


Nota: curvas DSC de las tres secciones etiquetadas como BOPP-I (negro), BOPP-M (rojo) y BOPP-F (azul) para las bobinas 0204, 0404 y 0304, respectivamente. Las zonas sombreadas en amarillo corresponden a los rangos de temperatura donde se obtiene los máximos de temperatura para el proceso de fusión de las zonas cristalinas.

En la figura 3.2 se observan curvas de enfriamiento de las muestras. Se puede apreciar que las curvas en conjunto tienen un patrón de cristalización en el intervalo de temperaturas de 110 a 120 °C.

Figura 3.2

Gráficos (a) BOPP0204, (b) BOPP0304, (c) BOPP0404.



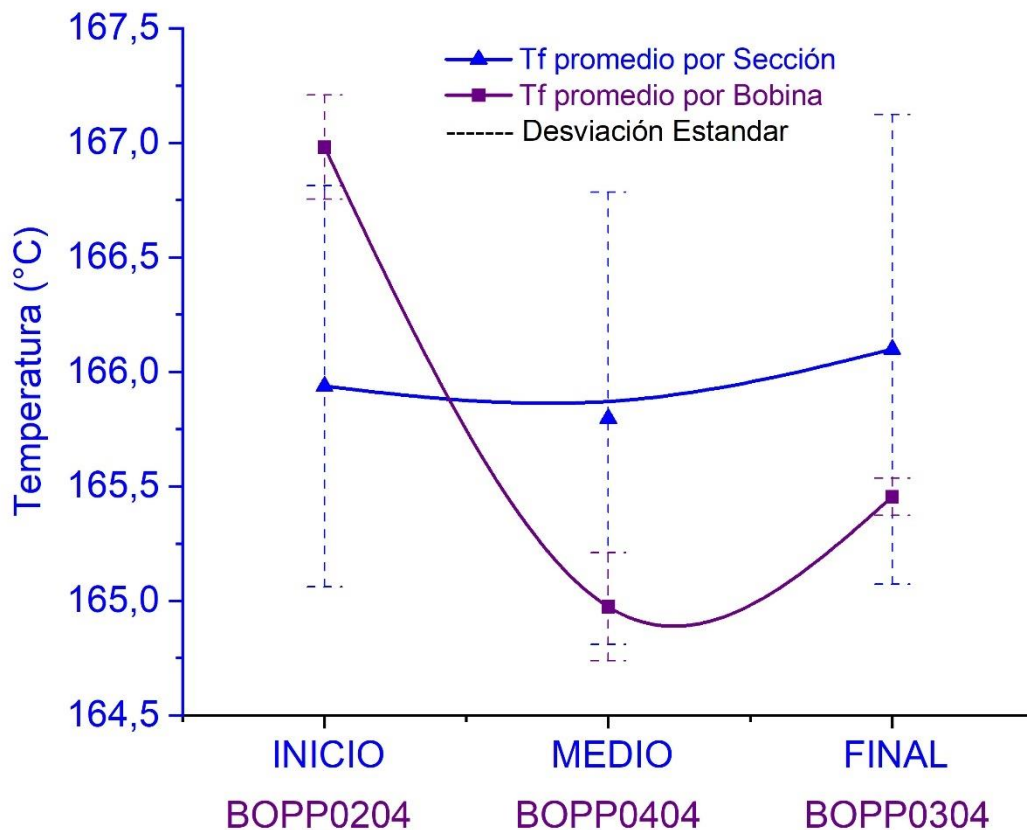
Nota: zonas resaltadas en amarillo corresponden a los rangos de temperatura donde se da el proceso de recristalización de las muestras.

Las diferencias en las curvas DSC sugieren que existe una variabilidad en el comportamiento térmico según la sección examinada, lo que indica que el material no es completamente homogéneo a lo largo de la bobina. Sin embargo, dado que las curvas muestran un comportamiento similar en el rango de temperatura de cristalización, es posible que las diferencias observadas en el intervalo de fusión estén relacionadas más con el proceso de

producción del BOPP-met [19], [20] que con las propiedades inherentes del material. Las variaciones en la orientación molecular durante el estirado o el enfriamiento pueden alterar la estructura cristalina de los polímeros [21].

Figura 3.3

Comportamiento de T_f , en la distintas secciones y bobinas.



Nota: las curvas representan el promedio de la T_f , con se respectiva desviación estándar para las secciones (azul) y bobinas (violeta). Revisar datos en tabla 3.1.

En el gráfico de dispersión de la figura 3.3 se presenta el comportamiento promedio de la T_f para las diferentes secciones y bobinas. Se observa que la curva que describe el comportamiento de las bobinas presenta una tendencia distinta en comparación con las secciones. Por ejemplo, la bobina BOPP0204, se alejó del promedio del resto de las bobinas. En

contraste, al analizar las temperaturas promedio por secciones, se aprecian que todos los valores son similares y presentan un comportamiento homogéneo.

Para determinar si estas las diferencias observadas en la figura 3.3 son estadísticamente significativas se realizó un análisis ANOVA. Los datos de T_f utilizados se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1

Resumen de las temperaturas de fusión obtenidas en el DSC.

Sección\Bobina	BOPP0204 (°C)	BOPP0404 (°C)	BOPP0304 (°C)	Promedio Secciones (°C)
Inicio	166,94	165,29	165,58	165,94
Medio	166,87	164,94	165,58	165,80
Final	167,26	165,32	165,71	166,10
Promedio Bobinas	167,02	165,18	165,62	

En la tabla 3.2 donde se presentan los resultados del análisis ANOVA, se observa que para el factor sección no hay diferencia estadísticamente significativa ya que el valor F calculado es menor que el valor F crítico. Por otro lado, para el factor bobina se observó que si hay diferencias estadísticamente significativas debido a que el valor F es 202,60 y el valor crítico de F es 6,94. Todo esto considerando que la variable dependiente es la T_f . Esto es un hallazgo relevante, ya que todas las bobinas provienen del mismo lote, lo que inicialmente sugeriría que no deberían existir diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Sin embargo, el análisis demuestra lo contrario, indicando que la elección de la bobina tiene un impacto considerable en la T_f .

Adicionalmente, se evidenciaron, con los valores de la tabla 3.1, temperaturas de fusión similares a los reportados en bibliografía [3], que indican que el intervalo de T_f para un homopolímero del PP se encuentra entre 160 y 170 °C. De acuerdo con S. Mrkic [7], el punto de fusión específico para un BOPP metalizado es de aproximadamente 163 °C.

Tabla 3.2*Datos importantes del análisis ANOVA.*

Origen de las variaciones	F	Valor crítico para F
Secciones	5,00	6,94
Bobinas	202,60	6,94

Nota: resumen de análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo [22].

Más adelante, en la Sección 3.3, se abordará en detalle cómo estas fluctuaciones pueden influir en el proceso de sellado.

3.2 Tracción BOPP-met

La tabla 3.3 presenta los datos del espesor de las bobinas y sus respectivas secciones, se evidencio una mínima variación y un comportamiento homogéneo en el espesor, con un promedio de 39,44 μm y una desviación estándar de 0,96 μm . Estas mediciones se llevaron a cabo con el objetivo de descartar que las fluctuaciones en el esfuerzo máximo fueran consecuencia de variaciones en el espesor del material.

Tabla 3.3*Datos del espesor tomados para secciones y bobinas.*

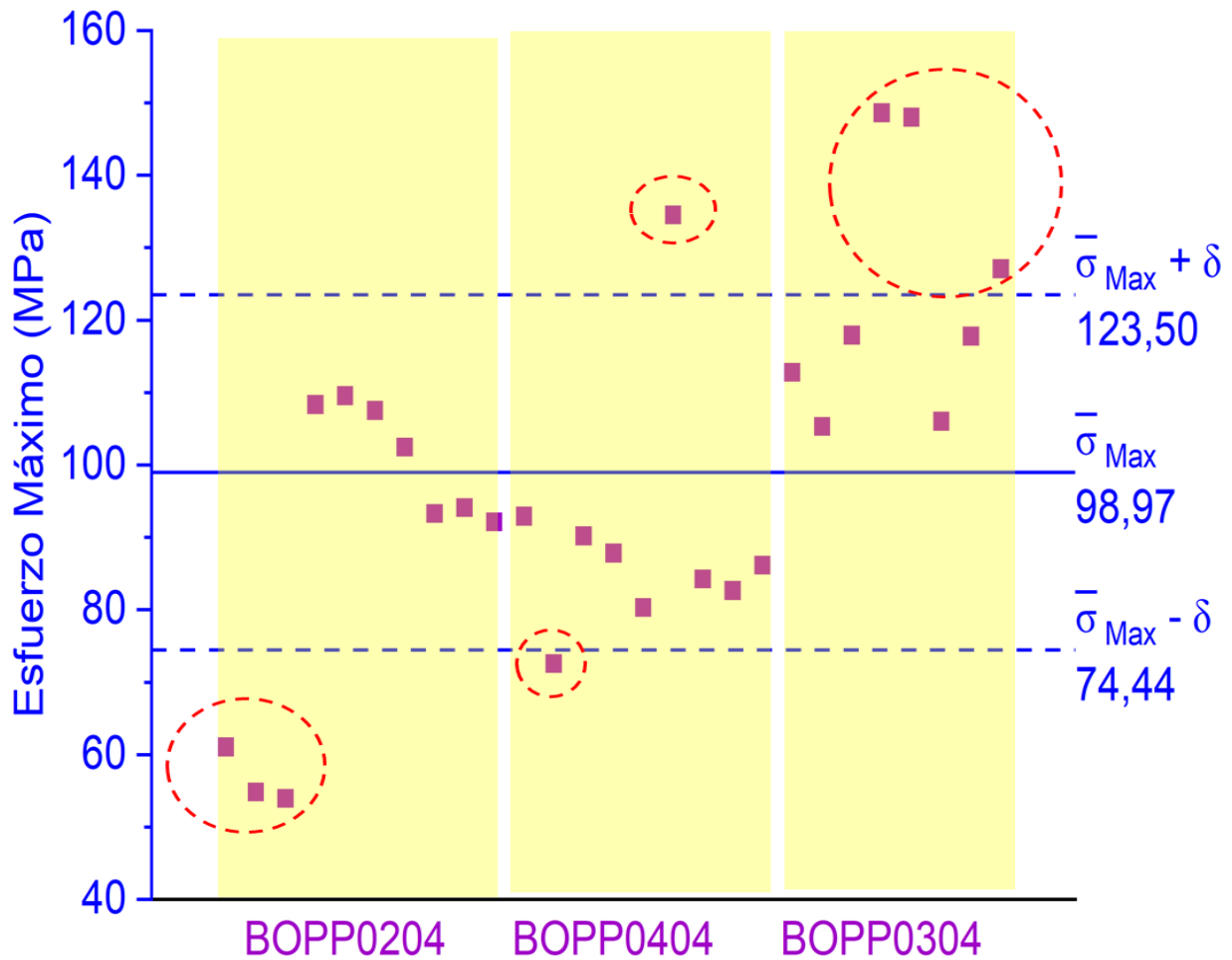
Espesor	39,44	μm
Desv. Estandar	0,96	μm

La figura 3.3 ofrece una comparación visual del esfuerzo máximo (punto de rotura) soportado por todas las muestras extraídas de las diferentes secciones de las bobinas analizadas. En general, se observa una variación en la resistencia del material entre las distintas bobinas. Aunque la mayoría de los datos se concentran en torno a la línea horizontal promedio de 98,97 MPa, existen valores para las tres bobinas que no siguen este comportamiento estadístico (líneas entrecortadas). Estas diferencias en las propiedades mecánicas del material en conjunto con los hallazgos derivado del análisis térmico sugieren que hay una variabilidad en la microestructura

del BOPP-met, la misma que podría ser consecuencia de la recristalización en las etapas post-extrusión de la materia prima.

Figura 3.4

Gráfico de dispersión del esfuerzo máximo de todas las muestras.



Nota: los puntos en cada barra (amarillo) pertenecen al comportamiento del esfuerzo máximo en cada sección a lo largo de una bobina. Se tomaron 9 muestras por bobinas. Las líneas entrecortadas representan valores que salen del intervalo delimitado por la media y su desviación estándar (líneas horizontales).

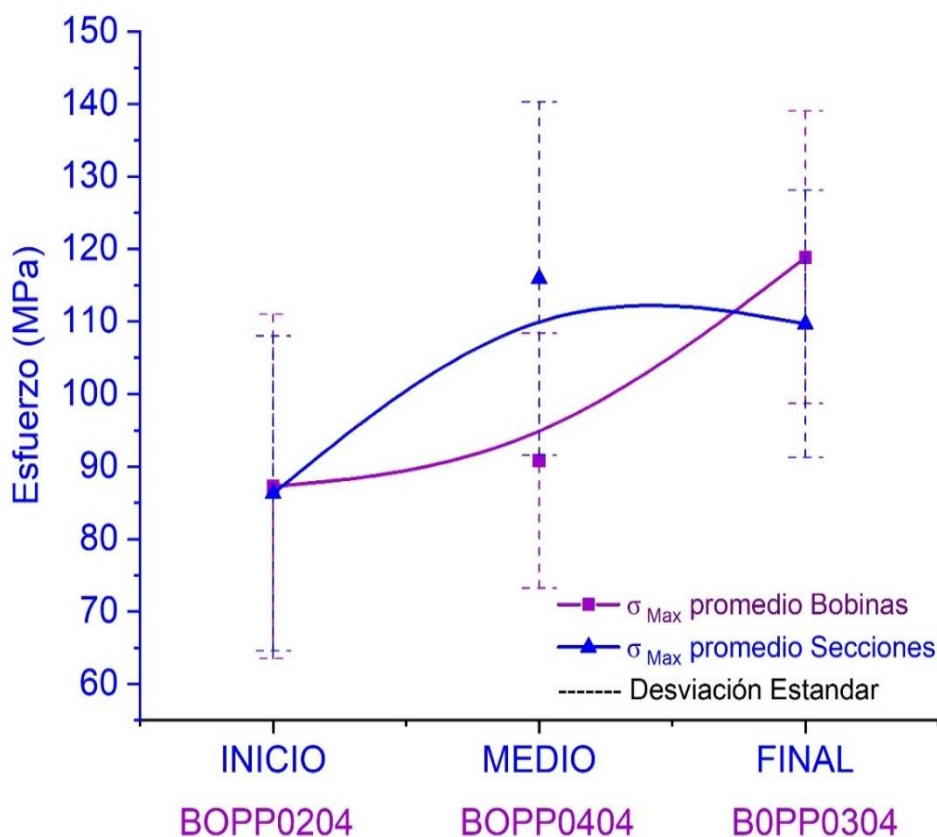
Para indagar con mayor profundidad en el comportamiento mecánico y cómo está influenciando por los factores bobina y sección, la figura 3.5 presenta los esfuerzos máximos promedios de las tres bobinas (BOPP0204, BOPP0404 y BOPP0304) distribuidos por secciones

(inicio, medio y final). El comportamiento de las secciones muestra una tendencia ascendente desde la sección inicial hasta la sección final. Los promedios por bobina, sigue un patrón similar, con un aumento gradual a lo largo de las tres bobinas.

Las dos curvas presentadas indican que existen variaciones en la resistencia mecánica, tanto dentro de las secciones de una misma bobina como entre diferentes bobinas, lo que sugiere una falta de homogeneidad en las propiedades mecánicas del material. Dada la variabilidad observada en los esfuerzos máximos, tanto por secciones como por bobinas, para estos datos también se realizó un análisis ANOVA.

Figura 3.5

Comportamiento de esfuerzo máximo en la distintas secciones y bobinas.



Nota: las curvas representan el promedio del esfuerzo máximo con su respectiva desviación estándar. De color azul se representa los promedios de las secciones (inicio, medio, final) y de color violeta las bobinas (BOPP0204, BOPP0404, BOPP0304).

Los valores experimentales del esfuerzo máximo presentados en la tabla 3.3 se utilizaron para el análisis, considerando como factores las diferentes secciones, bobinas y una interacción de ambos.

Tabla 3.4

Datos experimentales del esfuerzo máximo de cada muestra.

Sección\Bobina	BOPP0204	BOPP0404	BOPP0304	Promedio Secciones
Inicio	61,05	92,14	86,17	81,30
	54,84	92,91	112,78	
	53,95	72,57	105,32	
Medio	108,35	90,19	117,93	110,92
	109,55	87,83	148,61	
	107,53	80,32	148,00	
Final	102,46	134,52	106,01	104,69
	93,29	84,27	117,77	
	94,12	82,64	127,09	
Promedio Bobinas	87,24	90,82	118,85	

Los resultados del análisis ANOVA, presentados en la tabla 3.5, demuestran la existencia de diferencias estadísticamente significativas las entre las secciones, bobinas e interacción, lo que significa que los tres factores influyen de manera notable en la resistencia del material. Los valores de F obtenidos para las secciones (11,77) y bobinas (14,46) son considerablemente mayores que el valor crítico de F (3,55). Además, la interacción entre secciones y bobinas, con un valor de F (3,36), supera su valor crítico (2,93), señalando que la combinación de estos factores también afecta de manera significativa la resistencia mecánica.

Tabla 3.5

Datos importantes del análisis ANOVA.

Origen de las variaciones	F	Valor crítico para F
Secciones	11,77	3,55
Bobinas	14,46	3,55
Interacción	3,36	2,93

Nota: Resumen de análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo

Aunque las diferencias significativas en la microestructura de la materia prima pueden influir en el proceso de sellado, la propiedad del esfuerzo máximo no resulta particularmente relevante, ya que, después del sellado, los empaques flexibles no están sujetos a condiciones de esfuerzo-deformación. La evaluación de estas variaciones se utilizó principalmente como un medio de validación para asegurar la homogeneidad de la materia prima.

3.3 Curva de Sellado

La figura 3.6 presenta los resultados de los ensayos de tracción en probetas selladas a temperaturas entre 121 y 142 °C, con intervalos de 3 °C. Se graficó los puntos experimentales con sus desviaciones estándar, basadas en los resultados obtenidos para tres probetas por cada temperatura analizada. Además, se incluye una curva ajustada mediante un software matemático que simula el comportamiento de la fuerza de sellado en los puntos no ensayados, reflejando la tendencia general de la fuerza de sellado en función del incremento de temperatura.

En la figura 3.6 se observa los datos para cada temperatura, la desviación estándar no sigue un comportamiento estadístico definido. Estas variaciones pueden encontrarse en los comportamientos de las curvas observadas en los DSC de la sección 3.1. Las regiones con zonas cristalinas de menor T_f requieren temperaturas más bajas para lograr un sellado adecuado debido a la mayor movilidad de las cadenas de polímeros. Sin embargo, estas regiones son más propensas a defectos como una resistencia mecánica reducida o un sello menos duradero. Por otro lado, las zonas con cristalinidad de mayor T_f demandan temperaturas de sellado más altas y ofrecen sellos más fuertes y estables, pero requieren mayor energía para superar las barreras que presentan las macromoléculas cristalinas no fundidas [5]. Cuando una sección de la bobina presenta picos de fusión a temperaturas más bajas, el material se funde más rápido, lo que puede resultar en un exceso de energía aplicada y un posible sobrecalentamiento que afecta la integridad del sello. Por otro lado, si las temperaturas de fusión se desplazan hacia arriba, algunas zonas no alcanzan la temperatura suficiente, resultando en sellos frágiles y defectuosos.

Se observa que, a medida que la temperatura aumenta, la fuerza de sellado también lo hace hasta alcanzar un máximo a los 139 °C. A partir de este punto, la fuerza de sellado disminuye. Esto puede atribuirse a que temperaturas superiores a los 139 °C causan la pérdida de propiedades mecánicas del material, debido al inicio del proceso de fusión de ciertas zonas cristalinas. Además, es posible que el material comience a degradarse a temperaturas más elevadas.

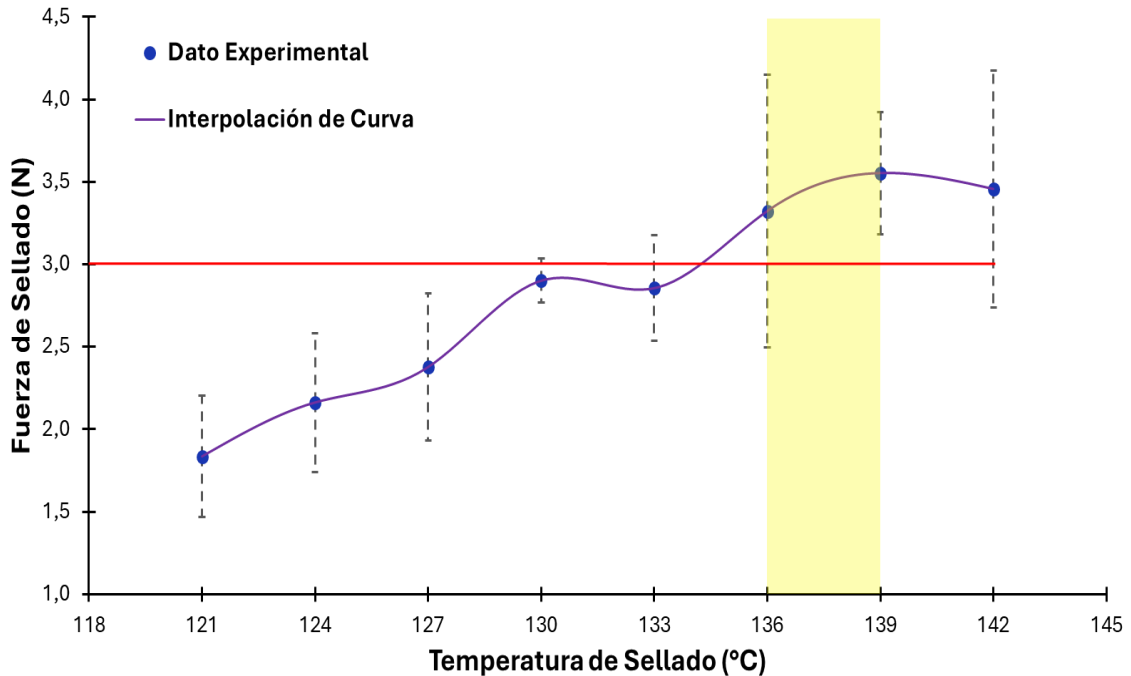
Aproximadamente a los 134 °C se alcanza el mínimo valor requerido (3 N, según la norma JIS[15]) de fuerza de sellado para que un empaque flexible de considerado de buena calidad. Sin embargo, se ha fijado un mínimo en 136 °C como el inicio del intervalo de temperatura de trabajo para evitar las fluctuaciones en la fuerza de sellado. Aunque la intersección entre la fuerza mínima de sellado y la curva de sellado ocurre aproximadamente a los 134 °C, este punto no se consideró debido a las desviaciones en los datos experimentales, que en algunos casos caen por debajo del mínimo de 3 N. Esta variabilidad y las fluctuaciones propias de los procesos en planta influyen en el rendimiento, por lo que se optó por no incluir dicho valor. El límite superior del intervalo de confianza se estableció en el punto máximo antes de que el material se degrade, ya que temperaturas más elevadas se acercan al punto de fusión del material, incrementando el riesgo de degradación y los costos energéticos.

Para mitigar estos defectos, se sugiere establecer un control de las temperaturas de sellado dentro del rango que garantice estar alejados de los dos extremos de temperatura que no contribuyen a un buen sellado. A partir de un análisis de la figura 3.6, se sugiere trabajar en el intervalo de 136 a 139 °C, minimizando así las probabilidades de sellos defectuosos.

Es importante ajustar las temperaturas de sellado según la estructura cristalina y la fracción amorfa presente en cada sección de la bobina. El uso de la curva de ajuste como guía para el control del proceso ayudará a evitar las desviaciones en la eficiencia del sellado y a promover la homogeneidad y la reproducibilidad del proceso de sellado.

Figura 3.6

Curva de sellado, fuerza en función de la temperatura.



3.4 Análisis económico

Para llevar a cabo el análisis económico de este proyecto, se consideró el trabajo realizado como si fuera una contratación de servicios externos a la empresa. A continuación, se presentan los datos necesarios para la proforma de los análisis realizados, basados en la metodología empleada y en los costos actuales de los mismos ensayos en un laboratorio certificado.

Tabla 3.6

Precios actuales de ensayos requeridos.

Servicio Externo			
Cantidad	Ensayos	\$/unidad	Subtotal
9	DSC	\$180,00	\$1.620,00
27	Tracción BOPP	\$40,00	\$1.080,00
24	Tracción sello	\$40,00	\$960,00
1	Análisis de datos	\$150,00	\$150,00
TOTAL			\$3.810,00

El costo de la investigación por lote de BOPP incluye una etapa de evaluación de las propiedades termomecánicas, seguida de la evaluación de la fuerza de sellado a diferentes temperaturas, con el objetivo de generar la curva de sellado del material de empaque. En la tabla 3.6 se muestran los costos de los ensayos realizados, los cuales son: DSC con un precio de \$180 por muestra, ensayo de tracción con un precio de \$40 por muestra y la interpretación y análisis de datos con un precio de \$150. Con estos valores y un conteo del número de ensayos realizado en cada etapa se obtiene un total de \$3.810,00.

Tabla 3.7

Perdidas por termosellado deficiente.

Perdidas Actuales-Termosellado deficiente	
Mano de obra	\$9.737,83
Retrabajo	\$235,52
Producto no apto	\$14.834,26
Total	\$24.807,61

Nota: Los valores presentados en esta tabla fueron aportados por el cliente del proyecto.

Como se detalla en la tabla 3.7, un sello defectuoso genera pérdidas económicas. Estas pérdidas incluyen los costos de mano de obra, el retrabajo de empaques defectuosos y los pallets bloqueados con producto no apto para la venta, lo que representa un total de \$24.807,61 por lote.

Considerando un modelo experimental como el aplicado en este proyecto, con un costo de \$3.810,00 el cliente final podría reducir notablemente las pérdidas por fallas en el sellado con una inversión del 14% de lo que representan sus pérdidas. Si el cliente final de este proyecto desearía repetir este ensayo para garantizar un muestreo más amplio con otro lote u otros proveedores tendría que hacer la inversión mencionada para alcanzar su objetivo.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

Tras aplicar las fases necesarias del proyecto y analizar los resultados obtenidos, se hallaron las siguientes conclusiones.

4.1.1 Conclusiones

Se identificó que en todos los casos la T_f se encuentra entre 160 y 170 °C. Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento térmico, que podrían deberse a variaciones en las propiedades microestructurales de la materia prima, las cuales varían según la bobina. Estas diferencias podrían influir directamente en el proceso de sellado.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas que dependen de las bobinas, secciones y de la interacción entre ambas. En todos los casos, los valores de F superan el valor crítico para la resistencia máxima. Estas variaciones no dependen del espesor, ya que este se mantiene homogéneo en la materia prima, con un promedio de aproximadamente 39,44 μm . Aunque el esfuerzo máximo no se considera un factor crítico en el proceso de sellado, su comportamiento respalda la hipótesis de que existen diferencias en la estructura cristalina a lo largo del material.

Se desarrolló la curva de sellado considerando restricciones específicas de tiempo y presión. A partir de esta curva, se sugiere que la temperatura óptima de sellado, donde se supera el mínimo de fuerza de apertura de 3 N, se encuentra entre 136 y 139 °C. Este rango asegura una adecuada adhesión y minimiza el riesgo de degradación del material, garantizando la calidad del sellado sin comprometer la integridad del empaque.

La inversión proyectada para el desarrollo es de aproximadamente \$3,810.00, que incluye análisis térmicos y mecánicos, además de la elaboración de una curva de sellado basada en

estudios realizados por una entidad externa. Esta inversión representa el 14% de las pérdidas actuales.

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda ampliar el alcance de este proyecto considerando un muestreo más extenso, múltiples lotes de producción y diferentes proveedores. Esto permitirá un análisis más exhaustivo del comportamiento de la materia prima bajo distintas condiciones, identificando posibles variaciones en la calidad y desempeño. Además, un muestreo más amplio facilitará la evaluación de la consistencia entre proveedores, ayudando a determinar cuál ofrece un material más homogéneo y adecuado para el proceso de sellado. Esta extensión del estudio también permitirá contrastar las propiedades mecánicas y térmicas de la materia prima, garantizando una selección más precisa que optimice la producción y reduzca los riesgos asociados a la variabilidad del material.
- Se recomienda incrementar el número de ensayos DSC y realizar un doble barrido térmico para obtener resultados más precisos del comportamiento térmico del material. Adicionalmente, se sugiere reducir la velocidad de calentamiento durante los análisis, lo que permitiría una mayor resolución en la detección de los picos térmicos y un análisis más detallado de las transiciones de fase en los termogramas, mejorando la interpretación de las curvas de calor.
- Se recomienda realizar ensayos complementarios a la materia prima para verificar su calidad y fortalecer los resultados obtenidos. Además de los ensayos de DSC y tracción previamente realizados, se podrían incluir pruebas de hermeticidad para evaluar la eficacia del sellado, y microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la microestructura y detectar posibles defectos superficiales. Estos ensayos proporcionarían

una comprensión más detallada de las propiedades del material, asegurando una evaluación más integral de su calidad y comportamiento.

Referencias

- [1] Kazuo Hishinuma, "HEAT SEALING TECHNOLOGY AND ENGINEERING FOR PACKAGING. Principles and Application." [Online]. Available: <http://www.destechpub.com>
- [2] M. Merabtene *et al.*, "Heat-sealing and microscopic evaluation of paper-based coated materials using various seal bar geometries in vertical form fill seal machine," *Packaging Technology and Science*, vol. 36, no. 8, pp. 667–679, Aug. 2023, doi: 10.1002/pts.2735.
- [3] B. Bamps, M. Buntinx, and R. Peeters, "Seal materials in flexible plastic food packaging: A review," *Packaging Technology and Science*, vol. 36, no. 7, pp. 507–532, Jul. 2023, doi: 10.1002/pts.2732.
- [4] J. R. J. Wagner, *Multilayer flexible packaging : technology and applications for the food, personal care and over-the-counter pharmaceutical industries*. William Andrew, 2010.
- [5] I. Ilhan, D. Turan, I. Gibson, and R. ten Klooster, "Understanding the factors affecting the seal integrity in heat sealed flexible food packages: A review," *Packaging Technology and Science*, vol. 34, no. 6, pp. 321–337, Jun. 2021, doi: 10.1002/pts.2564.
- [6] R. Aiyengar and J. Divecha, "Experimental and statistical analysis of the effects of the processing parameters on the seal strength of heat sealed, biaxially oriented polypropylene film for flexible food packaging applications," in *Journal of Plastic Film and Sheeting*, Jul. 2012, pp. 244–256. doi: 0.1177/8756087912440000.
- [7] S. Mrkić, K. Galić, and M. Ivanković, "Effect of Temperature and Mechanical Stress on Barrier Properties of Polymeric Films Used for Food Packaging," *Journal of Plastic Film and Sheeting*, vol. 23, no. 3, pp. 239–256, 2007, doi: 10.1177/8756087907086102.
- [8] J. Lu *et al.*, "Optimization of heat-sealing properties for antimicrobial soybean protein isolate film incorporating diatomite/thymol complex and its application on blueberry

- packaging,” *Food Packag Shelf Life*, vol. 29, p. 100690, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.fpsl.2021.100690.
- [9] M. Pal, “Recent developments in food packaging technologies.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/330555330>
- [10] S. Bach, K. Thürling, and J. Majschak, “Ultrasonic Sealing of Flexible Packaging Films – Principle and Characteristics of an Alternative Sealing Method,” *Packaging Technology and Science*, vol. 25, no. 4, pp. 233–248, Jun. 2012, doi: 10.1002/pts.972.
- [11] S. Cruz, A. Paulino, J. Duraes, and M. Mendes, “Real-Time Quality Control of Heat Sealed Bottles Using Thermal Images and Artificial Neural Network,” *J Imaging*, vol. 7, no. 2, p. 24, Feb. 2021, doi: 10.3390/jimaging7020024.
- [12] “Plastics-Determination of tensile properties-Part 3: Test conditions for films and sheets,” 2018. [Online]. Available: www.iso.org
- [13] ASTM, “Standar Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting D882-12,” 2014.
- [14] SENSOR PRODUCTS INC, “FUJI PRESCALE,” pp. 1–2, Mar. 2011, Accessed: Jun. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.sensorprod.com/prescale/product-pages/prescale-spanish/prescale-brochure-spanish.pdf>
- [15] “JIS Z 0238:1998 - Testing methods for heat sealed flexible packages.” Accessed: Jun. 27, 2024. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/jis/jis02381998>
- [16] American Society for Testing and Materials F2029-16, “Standard Practices for Making Laboratory Heat Seals for Determination of Heat Sealability of Flexible Barrier Materials as Measured by Seal Strength 1”, doi: 10.1520/F2029-16R21.
- [17] American Society for Testing and Materials F88, “Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials 1”, doi: 10.1520/F0088_F0088M.

- [18] J. Coreño-Alonso and M. T. Méndez-Bautista, “Relationship between structure and properties of polymers,” *Educacion Quimica*, vol. 21, no. 4, pp. 291–299, 2010, doi: 10.1016/s0187-893x(18)30098-3.
- [19] S. A. Ikilem Gocek, “Effect of Processing Parameters on Polypropylene Film Properties”.
- [20] P. A. Keчек’yan, S. L. Bazhenov, and A. S. Keчек’yan, “The Influence of Biaxial Orientation on the Mechanical Properties of Polyethylene Filled with ZnO Nanoparticles,” *Polymer Science, Series A*, vol. 60, no. 3, pp. 373–380, May 2018, doi: 10.1134/S0965545X18030057.
- [21] José Gámez Pérez, “Relación estructura-propiedades en placas y láminas de polipropileno y copolímeros en bloque etileno-propileno obtenidas por diferentes procesos de transformación”.
- [22] Minitab, “Interpretar los resultados clave para la ANOVA de un solo factor - Minitab.” Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/key-results/>

Apéndice A – Tablas

Tabla A1. Datos de las muestras para ensayos DSC.

Número	Lote/Fecha	Sección	Muestra	Masa (8 -10) mg	Fecha
1	BOPP0204	Inicio	BOPP-I-0204	9,0	17
2		Medio	BOPP-M-0204	8,6	17
3		Final	BOPP-F-0204	8,7	17
4	BOPP0404	Inicio	BOPP-I-0404	9,6	22
5		Medio	BOPP-M-0404	9,5	22
6		Final	BOPP-F-0404	9,2	22
7	BOPP0304	Inicio	BOPP-I-0304	9,4	22
8		Medio	BOPP-M-0304	9,3	22
9		Final	BOPP-F-0304	8,1	22

Tabla A2. Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Inicio	3	497,81	165,94	0,77
Medio	3	497,39	165,80	0,97
Final	3	498,30	166,10	1,05
BOPP0204	3	501,07	167,02	0,04
BOPP0404	3	495,55	165,18	0,05
BOPP0304	3	496,87	165,62	0,01

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Secciones	0,14	2	0,07	5,00	0,08	6,94
Bobinas	5,54	2	2,77	202,60	0,0001	6,94
Error	0,05	4	0,01			
Total	5,73	8				

Tabla A3. Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo

RESUMEN	BOPP0204	BOPP0404	BOPP0304	Total		
<i>Inicio</i>						
Cuenta	3	3	3	9		
Suma	169,83	257,62	304,27	731,72		
Promedio	56,61	85,87	101,42	81,30		
Varianza	14,98	132,94	188,54	472,40		
<i>Medio</i>						
Cuenta	3	3	3	9		
Suma	325,43	258,35	414,53	998,31		
Promedio	108,48	86,12	138,18	110,92		
Varianza	1,02	26,57	307,56	595,33		
<i>Final</i>						
Cuenta	3	3	3	9		
Suma	289,87	301,42	350,88	942,17		
Promedio	96,62	100,47	116,96	104,69		
Varianza	25,69	869,74	111,58	339,27		
<i>Total</i>						
Cuenta	9	9	9			
Suma	785,13	817,39	1069,68			
Promedio	87,24	90,82	118,85			
Varianza	564,34	309,74	407,21			
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Secciones	4389,07	2	2194,53	11,77	0,00	3,55
Bobinas	5394,83	2	2697,41	14,46	0,00	3,55
Interacción	2503,95	4	625,99	3,36	0,03	2,93
Dentro del grupo	3357,27	18	186,51			
Total	15645,11	26				

Tabla A4. Resultados de ensayos de sello a diferentes temperaturas.

Temperaturas	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Desv.Temp
121	2,24	1,75	1,52	1,83	0,37
124	2,55	1,71	2,23	2,16	0,42
127	2,88	2,21	2,04	2,38	0,44
130	2,75	3,00	2,96	2,90	0,13
133	2,92	3,13	2,51	2,85	0,32
136	3,83	3,77	2,37	3,32	0,82
139	3,82	3,71	3,13	3,55	0,37
142	4,22	2,79	3,36	3,46	0,72

Tabla A5. Interpolación de datos

Temperatura/sellado (°C)	Fuerza/sello (N)	Temperatura/sellado (°C)	Fuerza/sello (N)	Temperatura/sellado (°C)	Fuerza/sello (N)	Temperatura/sellado (°C)	Fuerza/sello (N)
121,00	1,83	126,28	2,28	131,55	2,88	136,83	3,43
121,11	1,86	126,38	2,29	131,66	2,88	136,93	3,45
121,21	1,88	126,49	2,31	131,76	2,87	137,04	3,46
121,32	1,90	126,59	2,32	131,87	2,87	137,15	3,47
121,42	1,92	126,70	2,33	131,97	2,86	137,25	3,48
121,53	1,94	126,80	2,35	132,08	2,86	137,36	3,48
121,63	1,96	126,91	2,36	132,19	2,85	137,46	3,49
121,74	1,98	127,02	2,38	132,29	2,85	137,57	3,50
121,84	1,99	127,12	2,40	132,40	2,85	137,67	3,51
121,95	2,01	127,23	2,41	132,50	2,85	137,78	3,51
122,06	2,02	127,33	2,43	132,61	2,85	137,88	3,52
122,16	2,04	127,44	2,45	132,71	2,85	137,99	3,52
122,27	2,05	127,54	2,47	132,82	2,85	138,10	3,53
122,37	2,06	127,65	2,49	132,92	2,85	138,20	3,53
122,48	2,07	127,75	2,52	133,03	2,86	138,31	3,54
122,58	2,08	127,86	2,54	133,14	2,86	138,41	3,54
122,69	2,09	127,96	2,56	133,24	2,87	138,52	3,54
122,79	2,10	128,07	2,58	133,35	2,88	138,62	3,55
122,90	2,11	128,18	2,60	133,45	2,89	138,73	3,55
123,01	2,11	128,28	2,63	133,56	2,90	138,83	3,55
123,11	2,12	128,39	2,65	133,66	2,91	138,94	3,55
123,22	2,13	128,49	2,67	133,77	2,93	139,05	3,55
123,32	2,13	128,60	2,69	133,87	2,94	139,15	3,55
123,43	2,14	128,70	2,71	133,98	2,96	139,26	3,55
123,53	2,14	128,81	2,73	134,09	2,98	139,36	3,55
123,64	2,15	128,91	2,75	134,19	2,99	139,47	3,55
123,74	2,15	129,02	2,77	134,30	3,01	139,57	3,55
123,85	2,16	129,13	2,79	134,40	3,03	139,68	3,55
123,95	2,16	129,23	2,81	134,51	3,05	139,78	3,55

124,06	2,16	129,34	2,83	134,61	3,07	139,89	3,55
124,17	2,17	129,44	2,84	134,72	3,09	139,99	3,54
124,27	2,17	129,55	2,86	134,82	3,11	140,10	3,54
124,38	2,18	129,65	2,87	134,93	3,13	140,21	3,54
124,48	2,18	129,76	2,88	135,04	3,15	140,31	3,54
124,59	2,18	129,86	2,89	135,14	3,17	140,42	3,53
124,69	2,19	129,97	2,90	135,25	3,19	140,52	3,53
124,80	2,19	130,08	2,90	135,35	3,21	140,63	3,52
124,90	2,19	130,18	2,91	135,46	3,23	140,73	3,52
125,01	2,20	130,29	2,91	135,56	3,25	140,84	3,52
125,12	2,20	130,39	2,92	135,67	3,27	140,94	3,51
125,22	2,21	130,50	2,92	135,77	3,28	141,05	3,51
125,33	2,21	130,60	2,92	135,88	3,30	141,16	3,50
125,43	2,22	130,71	2,92	135,98	3,32	141,26	3,50
125,54	2,23	130,81	2,91	136,09	3,34	141,37	3,49
125,64	2,23	130,92	2,91	136,20	3,35	141,47	3,49
125,75	2,24	131,03	2,91	136,30	3,37	141,58	3,48
125,85	2,25	131,13	2,90	136,41	3,38	141,68	3,47
125,96	2,26	131,24	2,90	136,51	3,40	141,79	3,47
126,07	2,26	131,34	2,89	136,62	3,41	141,89	3,46
126,17	2,27	131,45	2,89	136,72	3,42	142,00	3,46

Apéndice B – Figuras

Figura B1. Resultado DSC para bobina BOPP0204

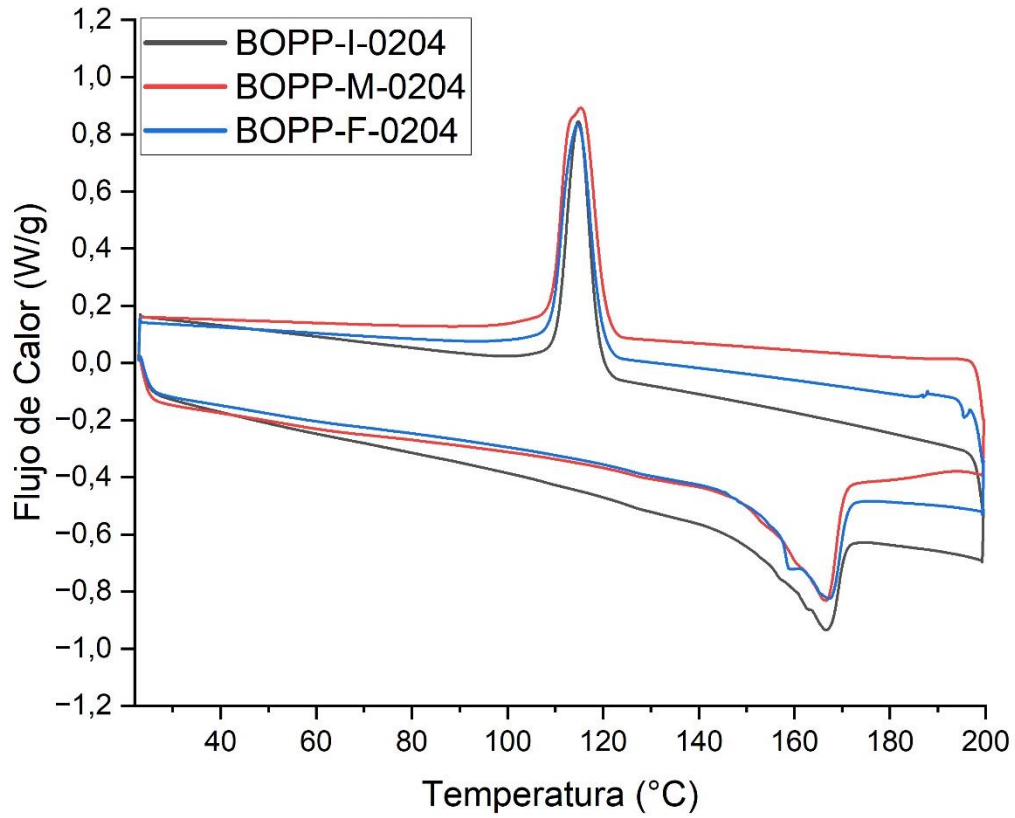


Figura B2. Resultado DSC para bobina BOPP0404

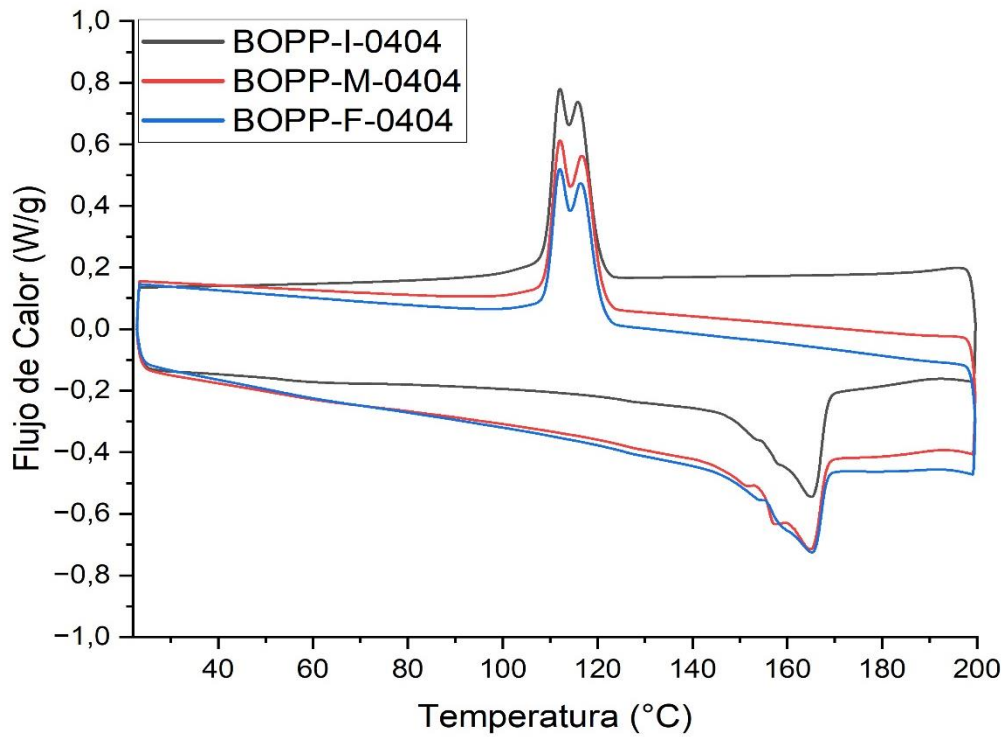


Figura B3. Resultados DSC para bobina BOPP0304

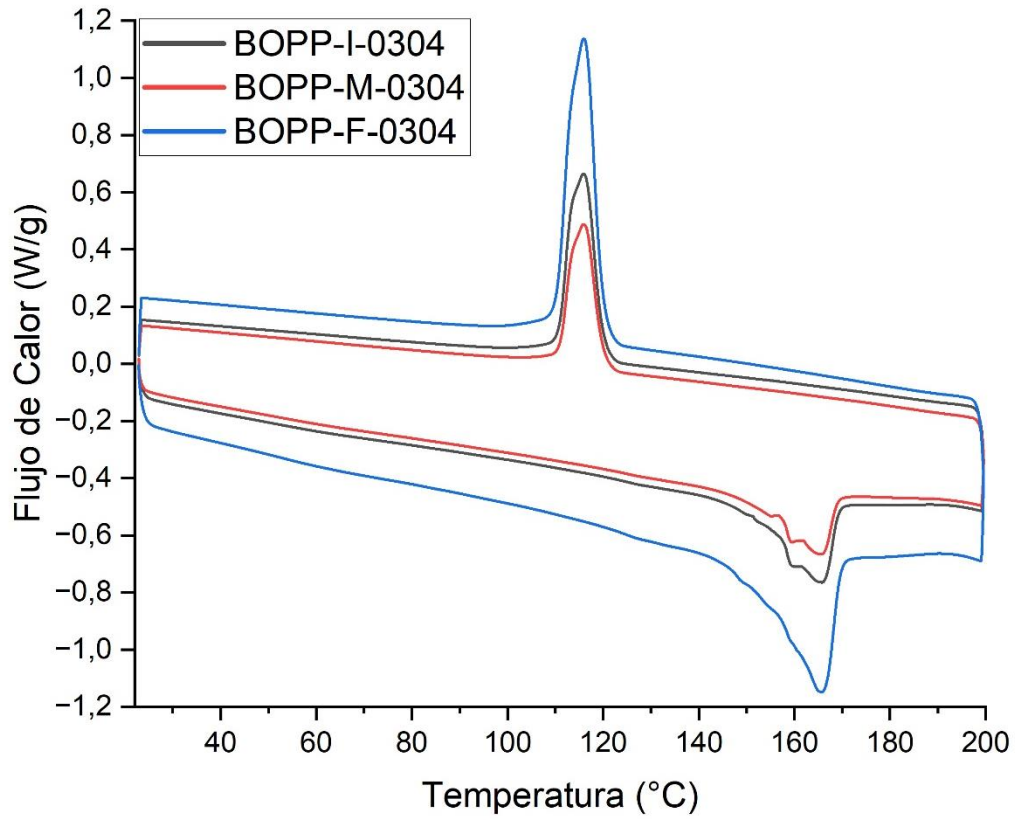


Figura B4. Resultado de tracción para bobina BOPP0204

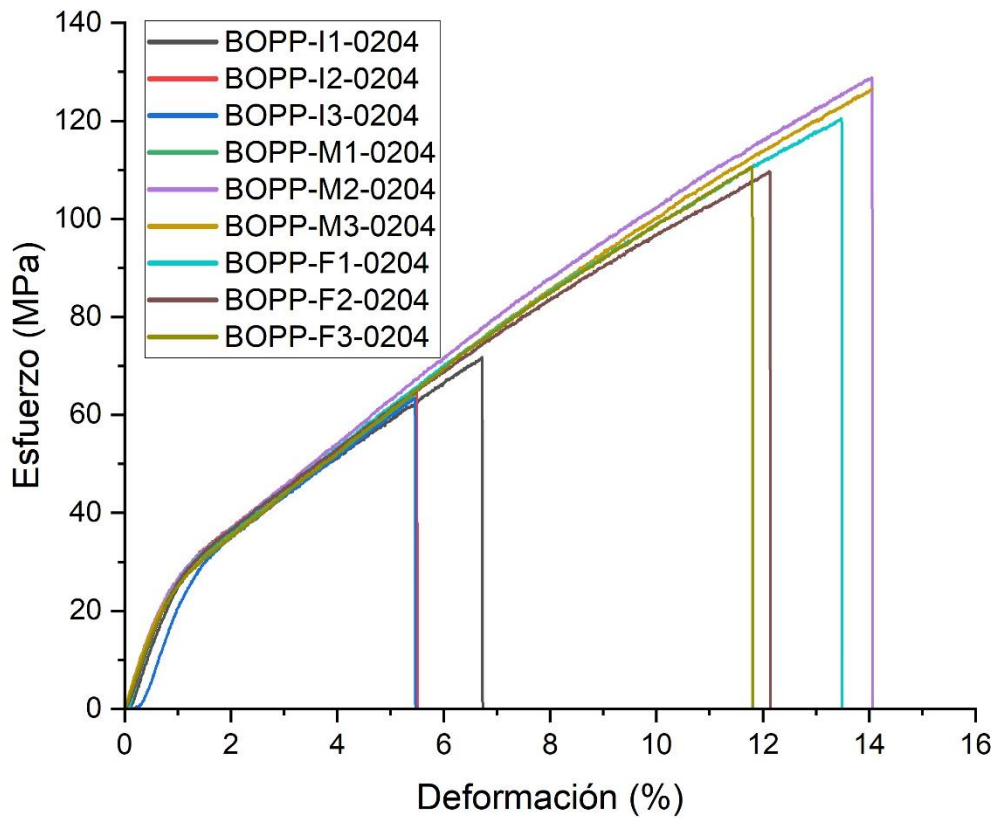


Figura B5. Resultado de tracción para bobina BOPP0404

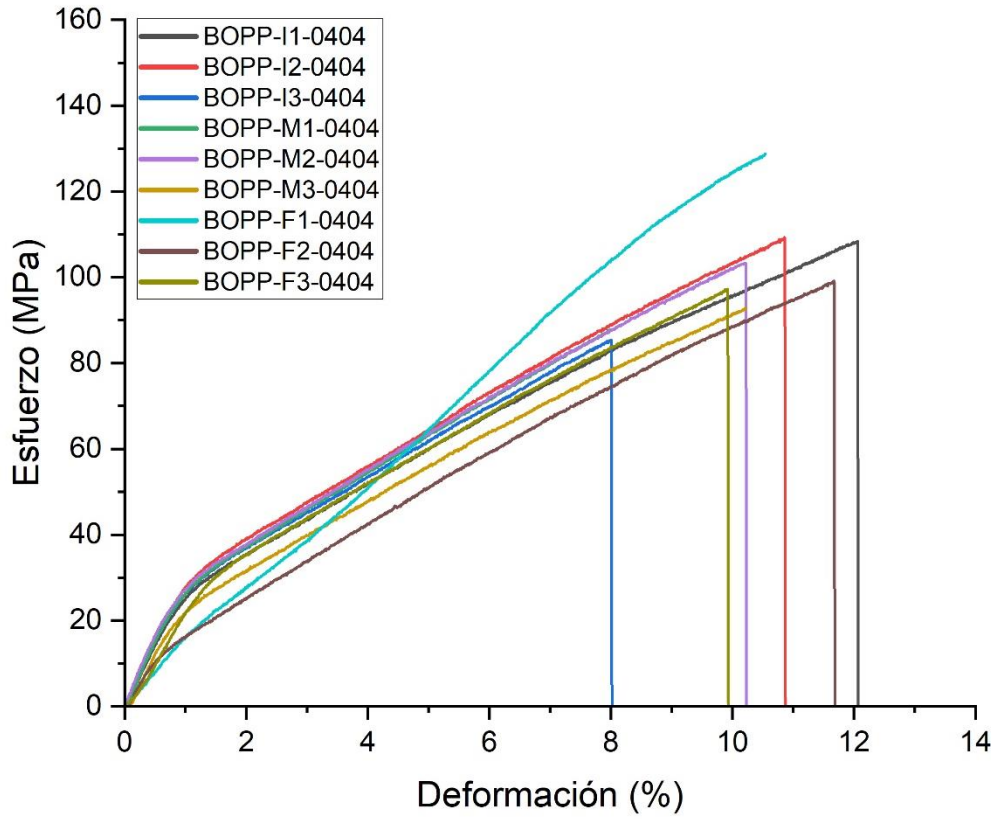


Figura B6. Resultado de tracción para bobina BOPP0304

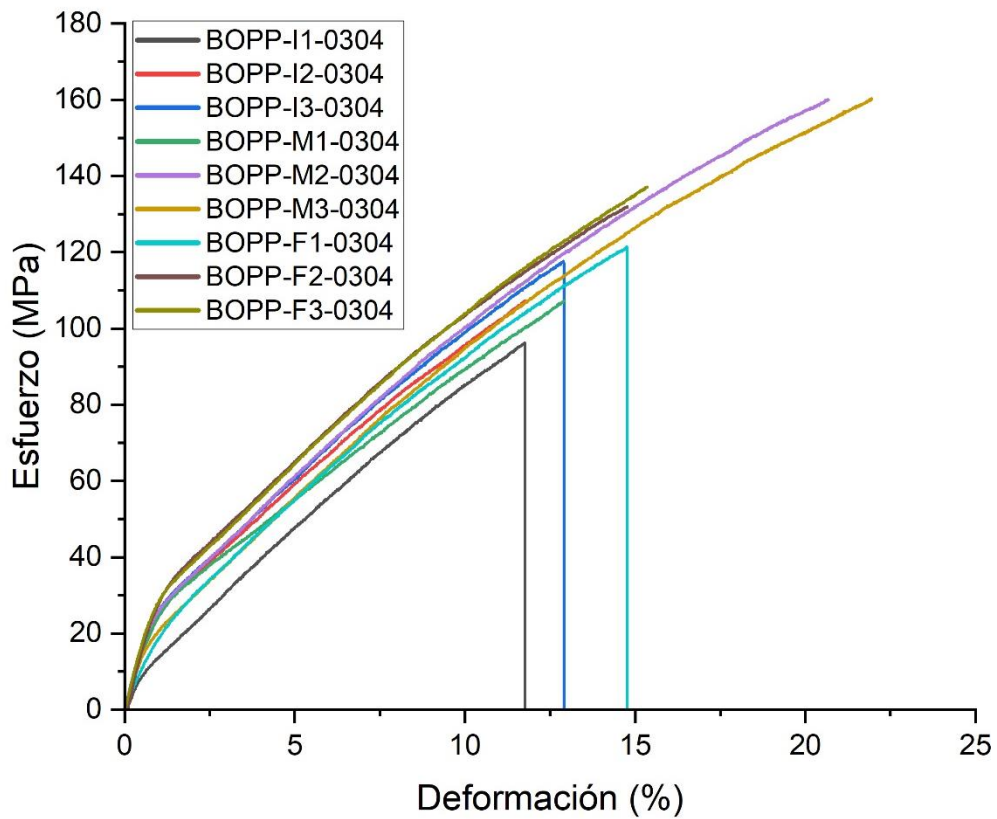


Figura B7. Tracción de sello a 121 °C

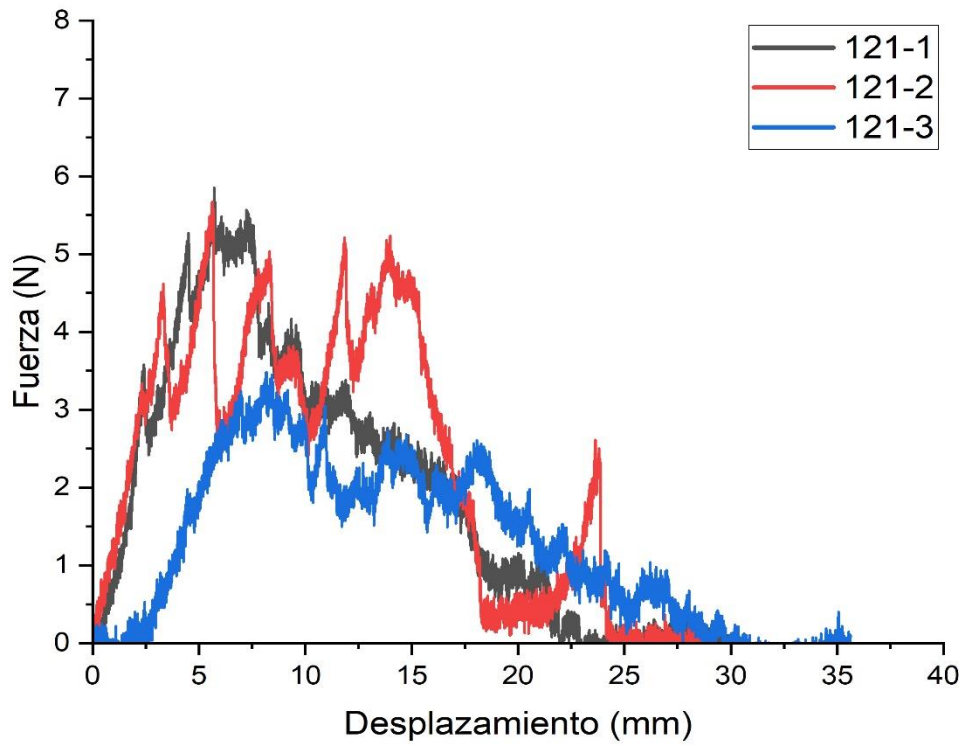


Figura B8. Tracción de sello a 124 °C

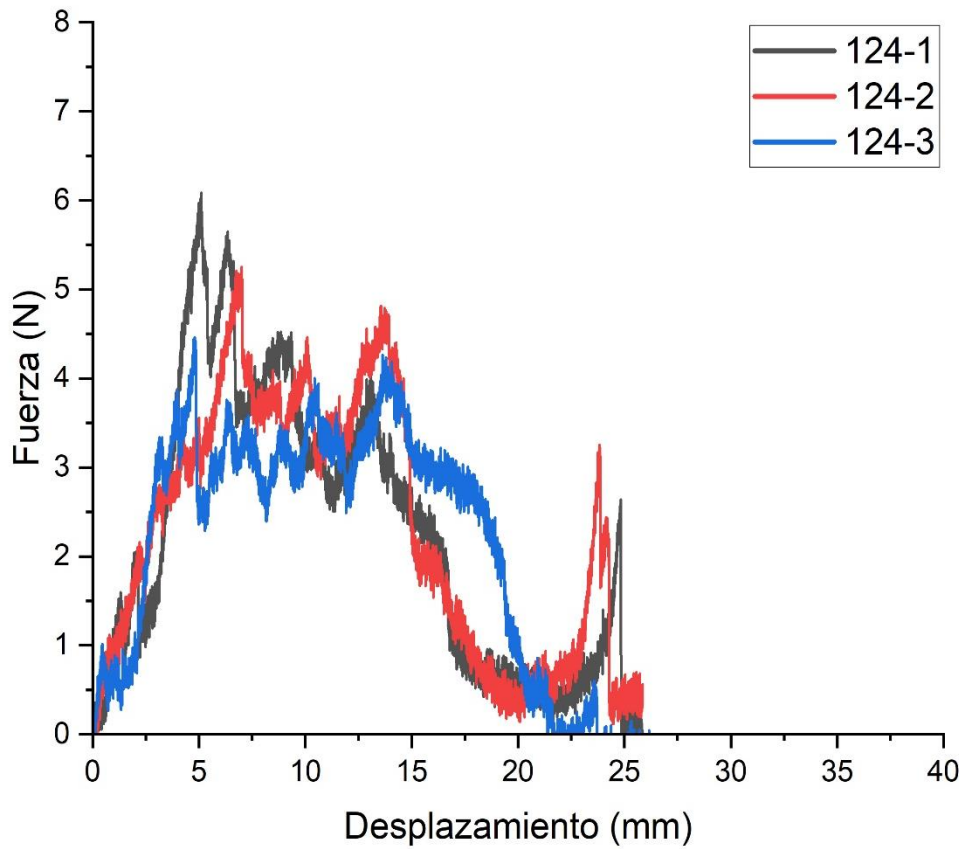


Figura B9. Tracción de sello a 127 °C

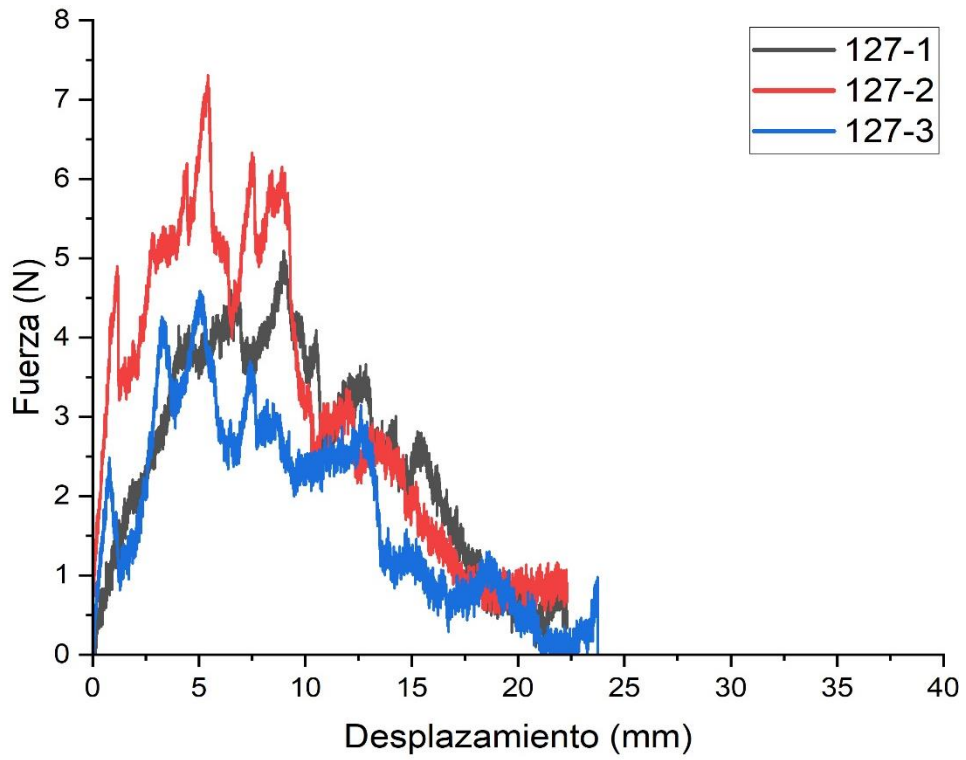


Figura B10. Tracción de sello a 130 °C

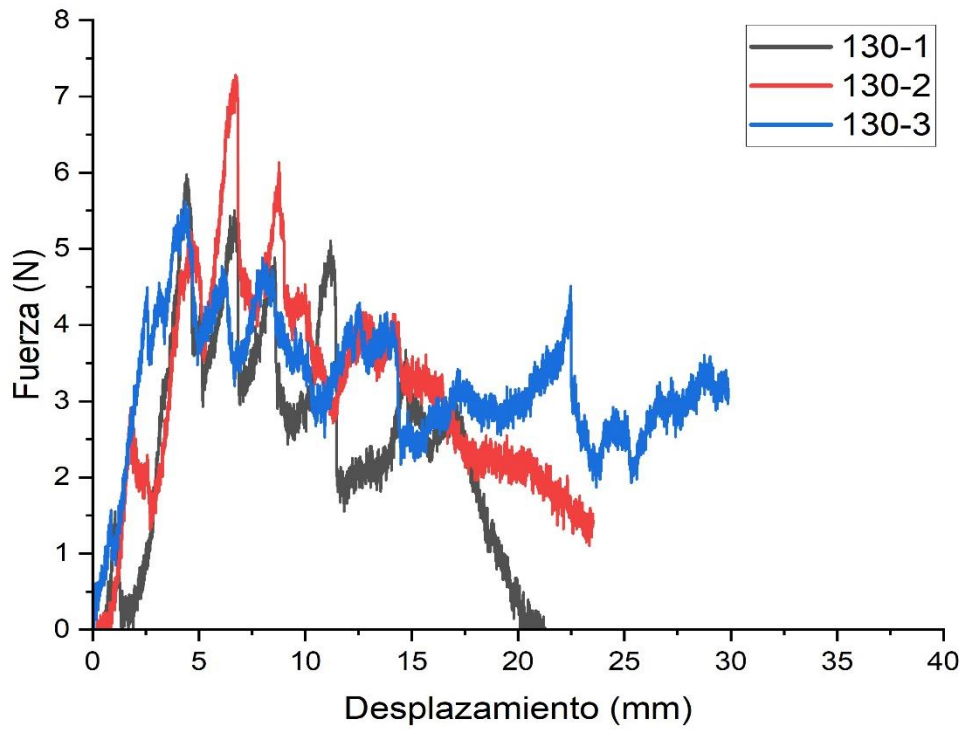


Figura B11. Tracción de sello a 133 °C

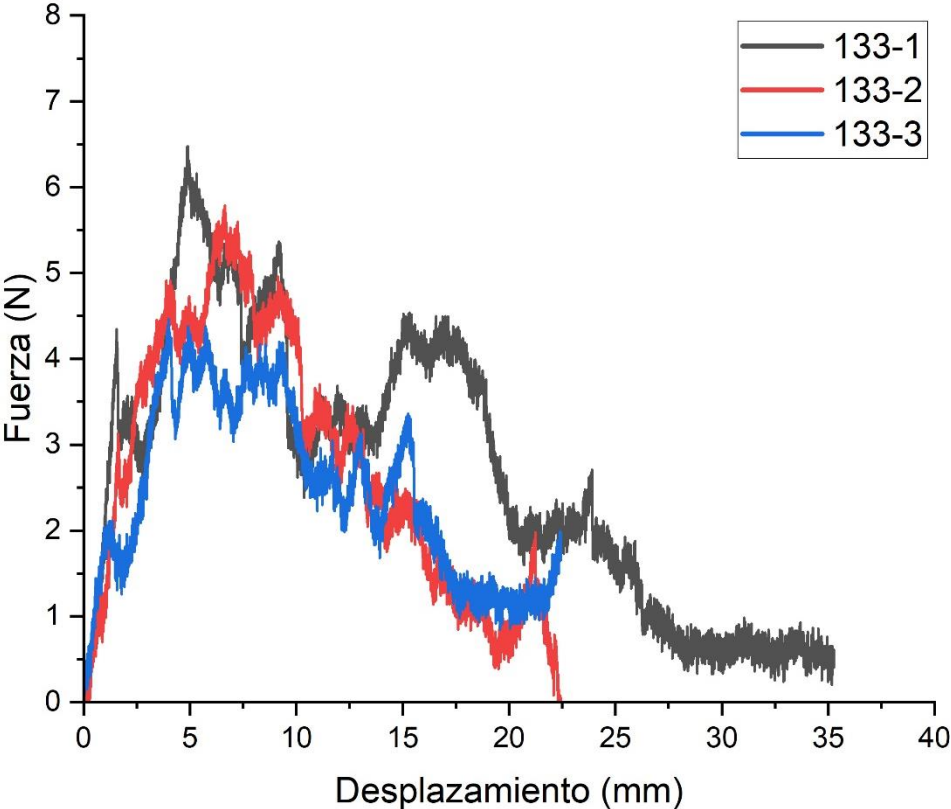


Figura B12. Tracción de sello a 136 °C

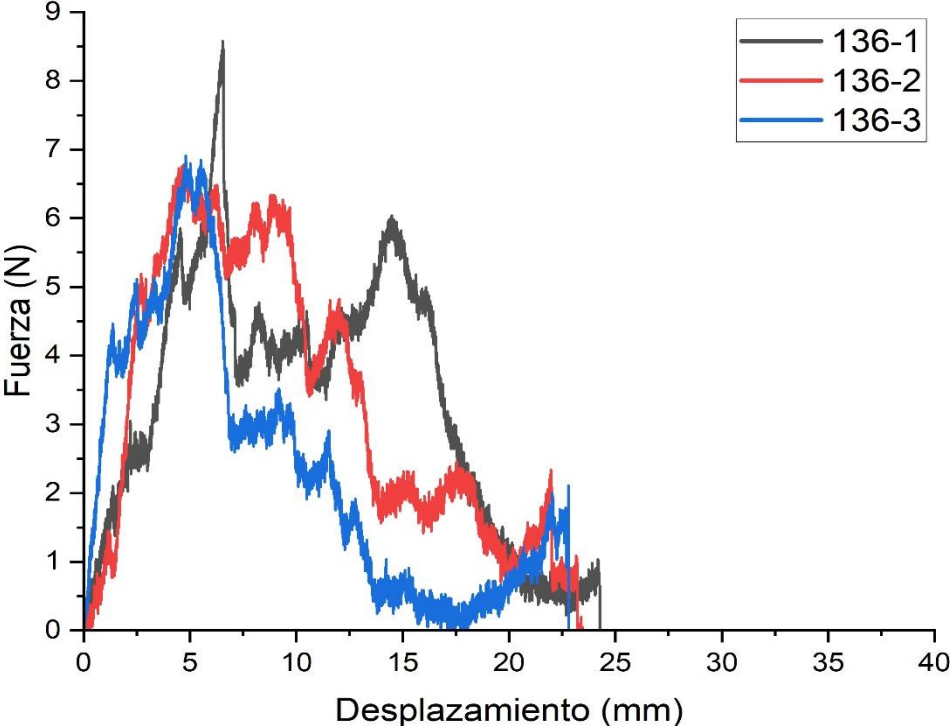


Figura B13. Tracción de sello a 139 °C

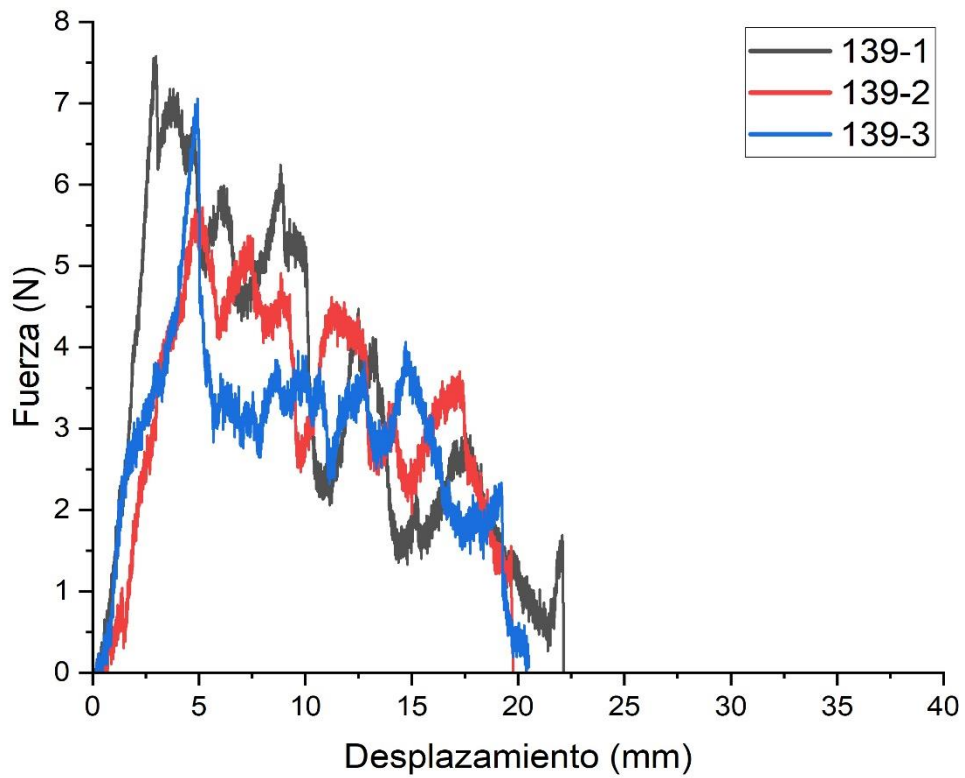


Figura B14. Tracción de sello a 142 °C

