

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE BENZOATO
DE SODIO Y UN AGENTE NUCLEANTE DE USO
COMERCIAL SOBRE LA TEMPERATURA DE
CRISTALIZACIÓN DEL POLIPROPILENO**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero Ejecución Químico, mención
Control.

Alumno:
Marco Contreras Alarcón

Profesor Guía:
Cristian Pereira Aburto



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis comparativo entre benzoato de sodio y un agente nucleante de uso comercial sobre la temperatura de cristalización del polipropileno

Nombre del candidato(a): Marco Andrés Contreras Alarcón

Carrera / Grado: Ingeniería Ejecución Química, mención Control

Campus: Concepción **Departamento:** Química y Medio Ambiente

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Pereira Aburto, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 08-01-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08-01-2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

*“Mas a Dios gracias, el cual nos lleva siempre en triunfo en Cristo Jesús,
y por medio de nosotros manifiesta en todo lugar el olor de su conocimiento.”*

1 Corintios 2:14

RESUMEN

KEYWORDS: POLIPROPILENO – AGENTE NUCLEANTE – TEMPERATURA DE CRISTALIZACIÓN

En este trabajo se realiza un análisis comparativo entre el benzoato de sodio y un agente nucleante de uso comercial, evaluando su efecto sobre la temperatura de cristalización del polipropileno. Para ello, se prepararon formulaciones de polipropileno sin agente nucleante, con benzoato de sodio y con un nucleante comercial, las cuales fueron caracterizadas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), permitiendo la determinación de la temperatura de cristalización bajo condiciones controladas de laboratorio.

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de benzoato de sodio incrementa la temperatura de cristalización del polipropileno respecto al material sin nucleante, confirmando su efecto como agente nucleante. Si bien el nucleante comercial presenta un mayor incremento de la temperatura de cristalización, el benzoato de sodio muestra un comportamiento térmico comparable, destacándose como una alternativa técnicamente viable desde el punto de vista del comportamiento de cristalización del material.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVOS	2
HIPÓTESIS	3
ALCANCE	3
LIMITACIONES.....	4
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	5
1.1 POLÍMEROS	8
1.2 POLIPROPILENO	8
1.3 CRISTALIZACIÓN DEL POLIPROPILENO	9
1.4 ADITIVOS NUCLEANTES	9
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	11
2.1 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	12
2.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS	12
2.3 EQUIPO DSC.....	13
2.4 ANÁLISIS DSC	14
2.5 LECTURA DE MUESTRAS	15
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
3.1 TEMPERATURA DE CRISTALIZACIÓN	21
3.2 COMPARACIÓN DE NUCLEANTES	22
3.3 IMPLICANCIAS EN TIEMPO DE CICLO DE PROCESAMIENTO	24
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Nombres genéricos de polímeros.....	7
Tabla 1-2 Topologías de polímeros.....	7
Tabla 1-3 Morfologías de polímeros.....	8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Clasificación de polímeros.....	6
Figura 1-2 Estructura química del polipropileno.....	8
Figura 1-3 Vista microscópica de un PP nucleado y no nucleado.....	10
Figura 2-1 Diagrama de procedimiento de preparación de muestra para análisis DSC.....	12
Figura 2-2 : Representación de un equipo DSC.....	14
Figura 2-3 Ciclos de calentamiento de un análisis DSC.....	15
Figura 3-1 Efecto de la concentración de benzoato de sodio sobre la Tc.....	21
Figura 3-2 Comparación de termogramas a distintas concentraciones de BzNa.....	22
Figura 3-3 Comparación de termogramas con aditivo comercial y BzNa.....	22
Figura 3-4 Comparación del ciclo de procesamiento de un pp nucleado y no nucleado.....	25

SIGLAS

PP : Polipropileno

DSC : Calorimetría diferencial de barrido

Tc : Temperatura de cristalización

PE : Polietileno

PET : Polietileno tereftalato

PEBD : Polietileno de baja densidad

PEAD : Polietileno de alta densidad

PS : Poliestireno

BzNa : Benzoato de sodio

INTRODUCCIÓN

El polipropileno es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados a nivel industrial debido a su bajo costo, buenas propiedades mecánicas, facilidad de procesamiento y amplia versatilidad de aplicaciones. En particular, el PP es ampliamente empleado en procesos de moldeo por inyección para la fabricación de artículos de consumo masivo, tales como tapas, envases y componentes técnicos, donde la eficiencia productiva resulta un factor determinante para la competitividad del proceso.

En la producción por inyección, el tiempo de ciclo está fuertemente condicionado por la etapa de enfriamiento del material dentro del molde, la cual depende directamente del comportamiento de cristalización del polímero. Una mayor temperatura de cristalización permite que el material solidifique a temperaturas más elevadas, reduciendo el tiempo requerido para alcanzar la rigidez necesaria para la eyección de la pieza, lo que se traduce en ciclos de procesamiento más cortos y un aumento de la productividad.

El uso de agentes nucleantes constituye una estrategia ampliamente utilizada para modificar la cinética de cristalización del polipropileno. Entre ellos, destacan los aditivos comerciales de alto desempeño, los cuales permiten incrementos significativos en la temperatura de cristalización. No obstante, su elevado costo puede limitar su adopción en aplicaciones de alto volumen y bajo margen.

El benzoato de sodio es un agente nucleante clásico, de menor costo y amplia disponibilidad, que ha demostrado la capacidad de aumentar la temperatura de cristalización del polipropileno. Sin embargo, su desempeño comparativo frente a nucleantes comerciales más avanzados requiere ser evaluado bajo criterios técnicos y productivos.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la factibilidad del uso de benzoato de sodio como agente nucleante alternativo a un aditivo comercial, analizando su efecto sobre la temperatura de cristalización del polipropileno y su impacto potencial en la productividad del proceso de fabricación de artículos.

JUSTIFICACIÓN

Este estudio resulta relevante desde el punto de vista industrial, ya que la reducción de los tiempos de ciclo en la fabricación de productos de polipropileno representa una mejora directa en la eficiencia productiva y competitividad de las empresas transformadoras de plástico. La posibilidad de utilizar un agente nucleante de menor costo, como el benzoato de sodio, en reemplazo de aditivos comerciales más costosos podría generar beneficios económicos significativos sin sacrificar el desempeño del material ni la calidad del producto final.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar el efecto del benzoato de sodio en la temperatura de cristalización del polipropileno mediante calorimetría diferencial de barrido para usarlo de reemplazo de un aditivo comercial actual.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Analizar por calorimetría diferencial de barrido el efecto del benzoato de sodio a distintas concentraciones con polvo de polipropileno.
2. Evaluar los resultados comparando la temperatura de cristalización del polipropileno con benzoato de sodio y con un aditivo comercial actual.
3. Relacionar el incremento de la temperatura de cristalización con su posible impacto en los tiempos de enfriamiento en los procesos de transformación.

HIPÓTESIS

La incorporación de benzoato de sodio como agente nucleante en el polipropileno produce un incremento significativo en la temperatura de cristalización del material, debido a la promoción de la nucleación heterogénea, generando un comportamiento térmico comparable al obtenido mediante el uso de un agente nucleante de carácter comercial. En consecuencia, se espera que el polipropileno aditivado con benzoato de sodio presente una cinética de cristalización similar a la del material nucleado con el aditivo comercial, evidenciando la factibilidad técnica de su utilización como alternativa nucleante en términos del comportamiento de cristalización del polímero.

ALCANCE

El presente trabajo tiene como alcance el análisis comparativo del efecto del benzoato de sodio y un agente nucleante de uso comercial sobre la temperatura de cristalización del polipropileno. El estudio se desarrolla a nivel experimental mediante técnicas de análisis térmico, específicamente calorimetría diferencial de barrido (DSC), con el objetivo de evaluar las variaciones en el comportamiento de cristalización del material en función del agente nucleante utilizado.

El análisis se limita a la determinación y comparación de la temperatura de cristalización del polipropileno sin agente nucleante, con benzoato de sodio y con un agente nucleante comercial.

LIMITACIONES

El presente trabajo presenta una serie de limitaciones inherentes al enfoque experimental y a los recursos disponibles, las cuales deben ser consideradas al momento de interpretar los resultados obtenidos.

En primer lugar, el análisis se limita a la evaluación del comportamiento térmico del polipropileno mediante la determinación de la temperatura de cristalización utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC). Por lo tanto, no se incluyen ensayos complementarios que permitan evaluar el efecto de los agentes nucleantes sobre propiedades mecánicas, ópticas o reológicas del material, las cuales podrían verse influenciadas por la modificación de la morfología cristalina.

Asimismo, las mediciones se realizaron bajo condiciones controladas de laboratorio, utilizando velocidades de enfriamiento definidas por el equipo DSC, las cuales no reproducen completamente las condiciones reales de procesamiento industrial, como las presentes en el moldeo por inyección. En consecuencia, los resultados obtenidos representan una aproximación al comportamiento del material, pero no permiten establecer conclusiones definitivas sobre el desempeño del polipropileno en condiciones industriales.

Finalmente, el trabajo no contempla un análisis estadístico exhaustivo ni una evaluación económica detallada de los agentes nucleantes, por lo que las conclusiones se centran exclusivamente en el comportamiento térmico del material y su comparación cualitativa, sin abordar aspectos de costo-beneficio o viabilidad económica a escala industrial.

CAPITULO 1:
MARCO TEÓRICO

1.1 POLÍMEROS

Un polímero es una sustancia que se caracteriza por poseer moléculas de un alto peso molecular lo que les permite ser llamados “compuestos macromoleculares”. Los polímeros están compuestos por grandes cadenas constituidas por la sucesión de una unidad básica llamada monómero.

Se conocen, tanto polímeros sintéticos como naturales, los cuales intervienen en un gran campo de aplicación, tanto en los organismos vivos como en los artículos de la vida cotidiana.

Así, los distintos tipos de polímeros pueden ser clasificados según el siguiente esquema:

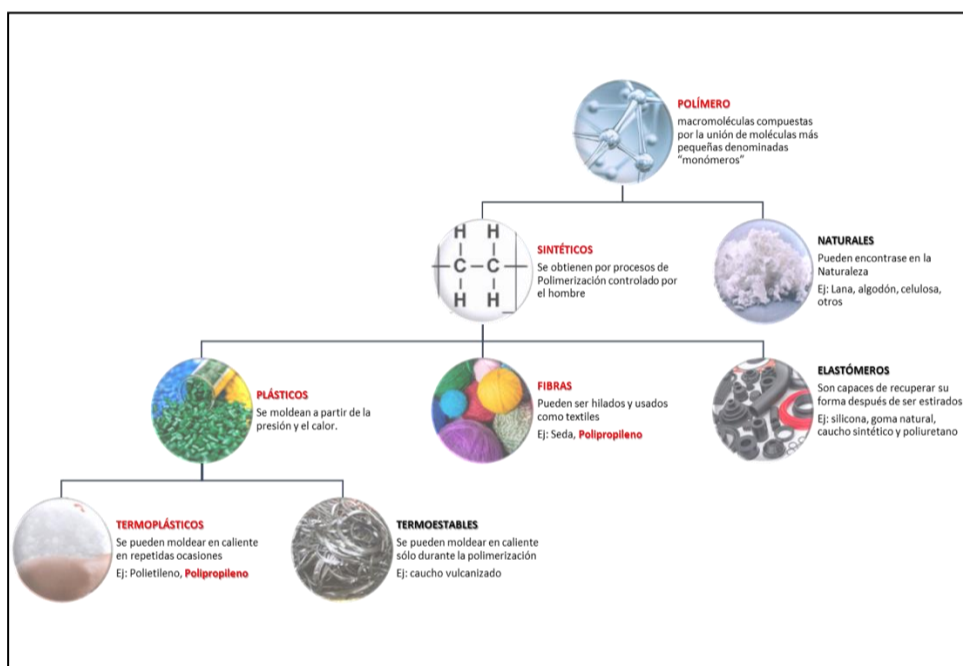


Figura 1-1: Clasificación de polímeros

Cada polímero posee un nombre genérico que está definido por el tipo de grupo químico que caracteriza su estructura de cadena, o bien, por el origen del monómero del cual se obtiene. Es así como se tienen algunos ejemplos de esta subdivisión, en la siguiente tabla:

Nombre genérico	Característica	Ejemplo
Poliolefinas	Se obtienen a partir de olefinas, es decir, mediante la polimerización de hidrocarburos insaturados	Polipropileno (PP) Polietileno (PE)
Poliamida	Sus cadenas presentan grupos Amida	Nylon

Poliésteres	Sus cadenas presentan grupos Éster	PET
-------------	------------------------------------	-----

Tabla 1-1: Nombres genéricos de polímeros

La topología se refiere al tipo de cadena que posee un determinado polímero. De esta forma, es posible observar tres tipos de cadenas diferentes (cadenas lineales, ramificadas y/o entrecruzadas):

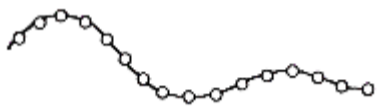
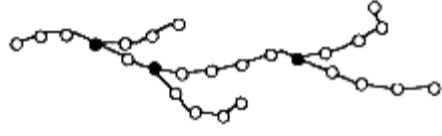
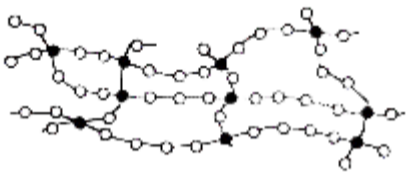
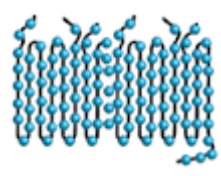
<p>Polímeros lineales: sus cadenas están compuestas por una perfecta sucesión de monómeros (Ej: PP, PEAD, PS)</p>	<p>a.</p> 
<p>Polímeros ramificados: poseen, dentro de una misma cadena, cadenas secundarias más pequeñas, producidas durante la reacción de polimerización (Ej: PEBD)</p>	<p>b.</p> 
<p>Polímeros entrecruzados: artificial o naturalmente, las cadenas poliméricas reaccionan entre sí, formando enlaces covalentes que unen dos o más cadenas (Ej: Caucho vulcanizado)</p>	<p>c.</p> 

Tabla 1-2: Topologías de polímeros

La morfología se refiere al ordenamiento espacial que las cadenas poliméricas adoptan en el estado sólido, y las propiedades finales del polipropileno dependen en gran medida de esto, lo cual se ve influenciado por las condiciones de enfriamiento, la presencia de aditivos y la historia térmica del material. ^[1]

<p>Polímeros cristalinos: Las cadenas de este tipo de polímeros, en el estado sólido, presentan un alto grado de ordenamiento espacial.</p>	
--	--

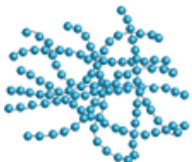
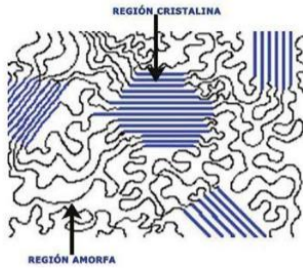
<p>Polímeros amorfos: En este tipo de polímeros NO es posible encontrar grado alguno de organización espacial de sus cadenas.</p>	
<p>Polímeros semi-cristalinos: Este tipo de polímero presenta un grado intermedio de organización espacial, es decir, en su estado sólido, se observan zonas cristalinas y zonas amorfas</p>	

Tabla 1-3: Morfologías de polímeros

1.2 POLIPROPILENO

El Polipropileno (PP) es un termoplástico semicristalino, pertenece a la familia de las poliolefinas, ya que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador estéreo específico, tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos de mayor desarrollo en el futuro. Además, debido a su gran volumen de consumo y bajo precio, se lo considera entre los polímeros denominados “commodities”. El PP, cuya cadena hidrocarbonada saturada, lo clasifica como un polímero de cadena apolar. Esta característica le confiere tantas propiedades que le otorgan un alto valor tecnológico y comercial. También es un producto inerte, con alta resistencia a la temperatura (> 150°C), totalmente reciclable y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental. Esta es una característica atractiva frente a materiales alternativos.

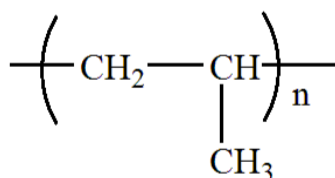


Figura 1-2: Estructura química del polipropileno

Su estructura molecular puede presentar diferentes configuraciones tácticas, siendo el polipropileno isotáctico el más utilizado a nivel industrial debido a su alto grado de cristalinidad y buenas propiedades mecánicas. [2]

1.3 CRISTALIZACIÓN DEL POLIPROPILENO

La cristalización del PP es un proceso termodinámicamente controlado que ocurre cuando las cadenas macromoleculares adoptan una disposición ordenada durante el enfriamiento desde el estado fundido. Este proceso se caracteriza por dos etapas principales: nucleación y crecimiento cristalino. La nucleación puede ser homogénea o heterogénea, siendo esta última la más común en sistemas poliméricos industriales, ya que suele ser promovida por impurezas o aditivos. La velocidad de cristalización y la temperatura de cristalización (T_c) son parámetros fundamentales que determinan la morfología final del material y sus propiedades de uso.

La temperatura de cristalización (T_c) es un parámetro clave que indica la temperatura a la cual se produce el máximo flujo de calor exotérmico durante el enfriamiento, y está directamente relacionada con la velocidad de cristalización del polímero.^[3]

Un incremento en la T_c implica que el material cristaliza a temperaturas más altas, lo que resulta particularmente beneficioso en procesos industriales, ya que permite una solidificación más rápida y una reducción de los tiempos de enfriamiento.

1.4 ADITIVOS NUCLEANTES

Los aditivos o agentes nucleantes son sustancias que, al ser incorporadas al polímero fundido, facilitan la formación de núcleos de cristalización, aumentando la velocidad del proceso y la temperatura de inicio de la cristalización. En otras palabras, modifican la forma en que el polímero cristaliza al enfriarse, mediante la adición de pequeñas cantidades de aditivo. Su acción se basa en la reducción de la energía libre necesaria para la nucleación, proporcionando sitios preferenciales para el ordenamiento de las cadenas poliméricas. Como resultado, se obtienen materiales con una distribución más uniforme de las esferulitas y tiempos de enfriamiento más reducidos durante el moldeo del material.

En el polipropileno los nucleantes no reaccionan químicamente con la cadena polimérica, sino que actúan como superficies energéticamente favorables para la nucleación^[3]. Al tener una velocidad de cristalización relativamente baja hace que forme cristales grandes por lo cual es ventajoso añadir aditivos nucleantes ya que favorecen la formación de un mayor número de núcleos de cristalización actuando como verdaderas “semillas” facilitando la organización de las cadenas poliméricas.

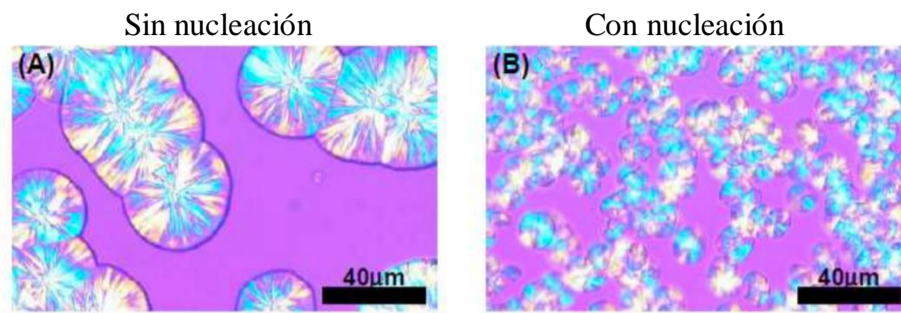


Figura 1-3: Vista microscópica de un PP nucleado y no nucleado

Uno de los aditivos nucleantes comerciales que existen es el benzoato de sodio el cual es una sal orgánica derivada del ácido benzoico. Su eficacia radica en su capacidad para generar partículas finamente dispersas en la matriz polimérica, que actúan como sitios de nucleación heterogénea. Al incorporarse en pequeñas concentraciones, el benzoato de sodio incrementa la temperatura de cristalización del PP, reduce el tamaño de las esferulitas y la estabilidad térmica del material. Estos efectos son particularmente importantes en aplicaciones que requieren tiempos de ciclo cortos y alta calidad superficial, como en la inyección de envases.

CAPITULO 2:
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

- Polvo de polipropileno homopolímero
- Aditivo benzoato de sodio
- Cápsulas de aluminio para DSC de 40ul
- Balanza analítica
- Mixer de laboratorio
- Mini extrusora de laboratorio
- Universal film maker
- Prensa
- Equipo DSC

2.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Se prepararon muestras de 100g en concentraciones de 2%, 3% y 4% p/p del aditivo las cuales fueron mezcladas en un mixer de laboratorio para finalmente procesarlas en una mini extrusora usando una temperatura de fundido de 230°C con el fin de lograr una mezcla homogénea en donde se obtuvo un material fundido y homogéneo.

La muestra obtenida se funde en un equipo universal film maker para luego ser prensado a fin de obtener un disco de 0,5mm de espesor del cual se saca la muestra definitiva para el análisis por DSC. El peso de esta muestra varía entre 6-7 mg.

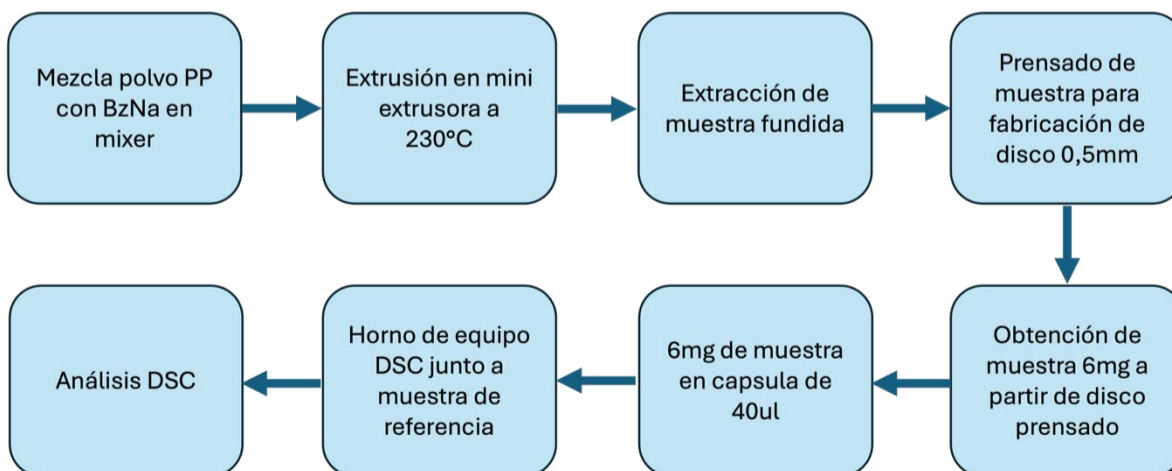


Figura 2-1: Diagrama de procedimiento de preparación de muestra para análisis DSC

2.3 EQUIPO DSC

Un DSC (Calorimetría Diferencial de Barrido) es un equipo de análisis térmico que se utiliza para medir los cambios de energía (calor) que experimenta un material cuando se calienta, enfría o mantiene a temperatura constante. Consta de varios componentes clave que permiten medir los flujos de calor asociados a transiciones térmicas de un material como la fusión y cristalización. Sus partes principales son:

Horno : Es una cámara térmica de alta precisión que permite programar rampas de calentamiento y enfriamiento controladas y que mantiene condiciones térmicas estables y homogéneas.

Sensores de flujo de calor : Miden la diferencia de flujo de calor entre el crisol de la muestra y el crisol de referencia (vacío).

Crisoles : Pequeños recipientes donde se coloca la muestra y la referencia constituidos comúnmente de aluminio y pueden ser abiertos, cerrados o herméticos, según el análisis.

Sistema de control de temperatura : Incluye termopares o sensores RTD de alta precisión y garantiza la exactitud en la medición de temperatura y flujo térmico.

Sistema de atmósfera controlada : Permite trabajar con distintos gases como el Nitrógeno, aire, oxígeno. Controla flujo y pureza del gas, evitando oxidación o reacciones no deseadas.

Sistema de enfriamiento : Necesario para estudios de cristalización y ciclos térmicos rápidos.

Electrónica y sistema de adquisición de datos : Convierte las señales térmicas en curvas DSC (mW vs temperatura o tiempo) y posee una alta sensibilidad para detectar eventos térmicos pequeños.

Software de análisis : Permite programar métodos térmicos, calibrar temperatura y entalpía, analizar T_g , T_m , T_c , ΔH , C_p y exportar datos y reportes

Sistema de calibración : Usa materiales patrón (indio, zinc, estaño) lo que asegura precisión en temperatura y entalpía.

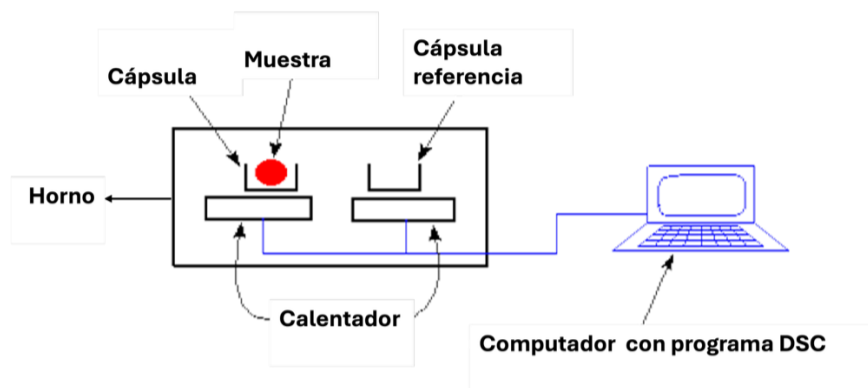


Figura 2-2 : Representación de un equipo DSC

2.4 ANÁLISIS DSC

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) es una técnica termo analítica que permite estudiar los cambios de energía asociados a transiciones físicas o químicas de un material en función de la temperatura. En el caso del polipropileno, la DSC se utiliza para determinar las temperaturas de fusión, cristalización y otras transiciones térmicas. A través del análisis de las curvas termográficas, es posible identificar la temperatura de cristalización (T_c) y cuantificar la influencia de aditivos como el benzoato de sodio sobre este parámetro. Esta información resulta esencial para correlacionar la estructura cristalina con las propiedades finales del polímero.

Esta técnica actúa con un programa de temperaturas que básicamente consiste en calentamiento-enfriamiento-calentamiento de la muestra. Cada análisis por DSC consta de tres ciclos, en el primero se realiza la estabilización de la temperatura a 40°C , para posterior aumento hasta los 230°C a razón de $20^\circ\text{C}/\text{min}$ y finalmente estabilizar a 230°C por 5 min, esto para borrar la memoria térmica del material. En el segundo ciclo se pasa de 230°C a 40°C a razón de $20^\circ\text{C}/\text{min}$ y se estabiliza en 40°C por 5 min. Para el último ciclo se aumenta de 40°C a 230°C a razón de $20^\circ\text{C}/\text{min}$, para fundir los cristales anteriormente formados.

1-Dinámico: 40-230°C a 20°C/min

2-Isoterma: 230°C por 5 min

3-Dinámico: 230-40°C a 20°C /min

4-Isoterma: 40°C por 5 min

5-Dinámico: 40-230°C a 20°C/min

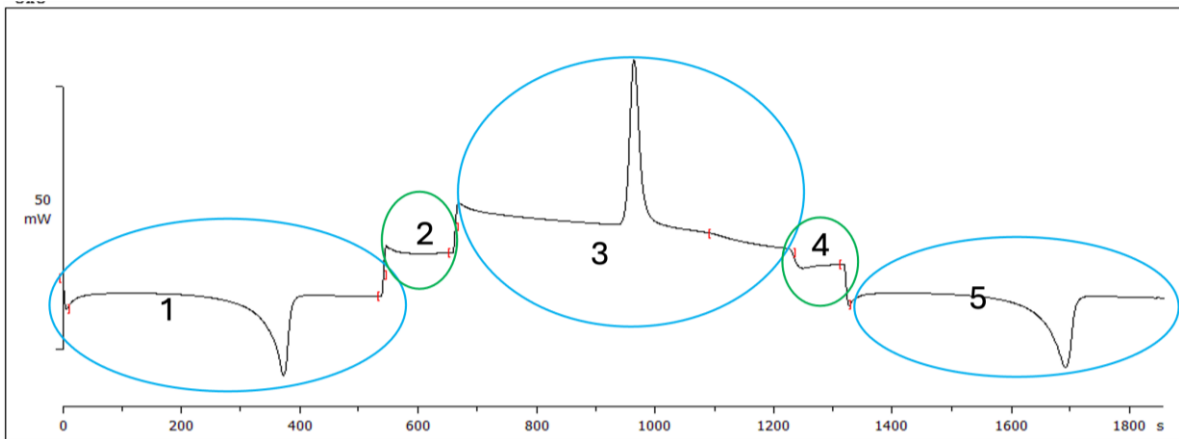


Figura 2-3 : Ciclos de calentamiento de un análisis DSC

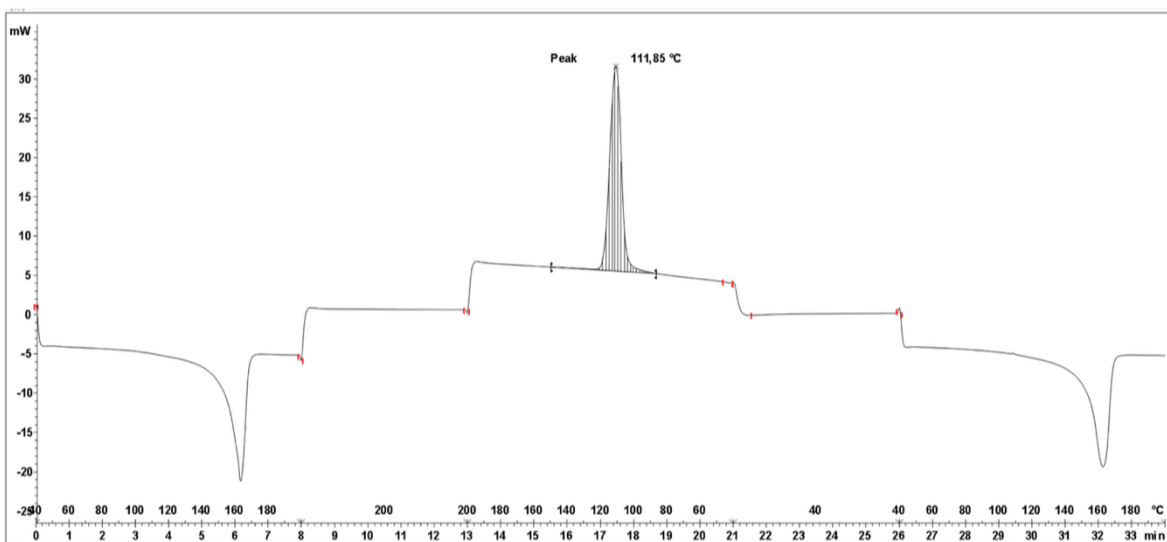
2.5 LECTURA DE MUESTRAS

Se realizó análisis térmico a muestras con diferentes dosificaciones de benzoato de sodio. Estos ensayos se ejecutaron en duplicado y sus resultados y termogramas se detallan a continuación.

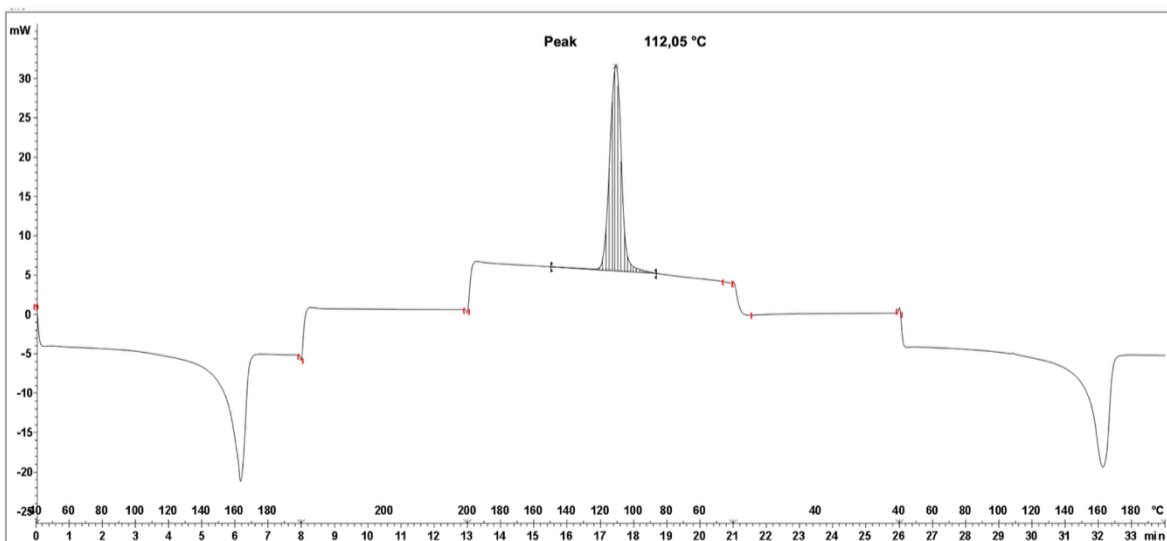
Aditivación al 0%

Muestra	Tc (°C)
1	111,9
2	112,1
promedio	112

Termograma muestra 1



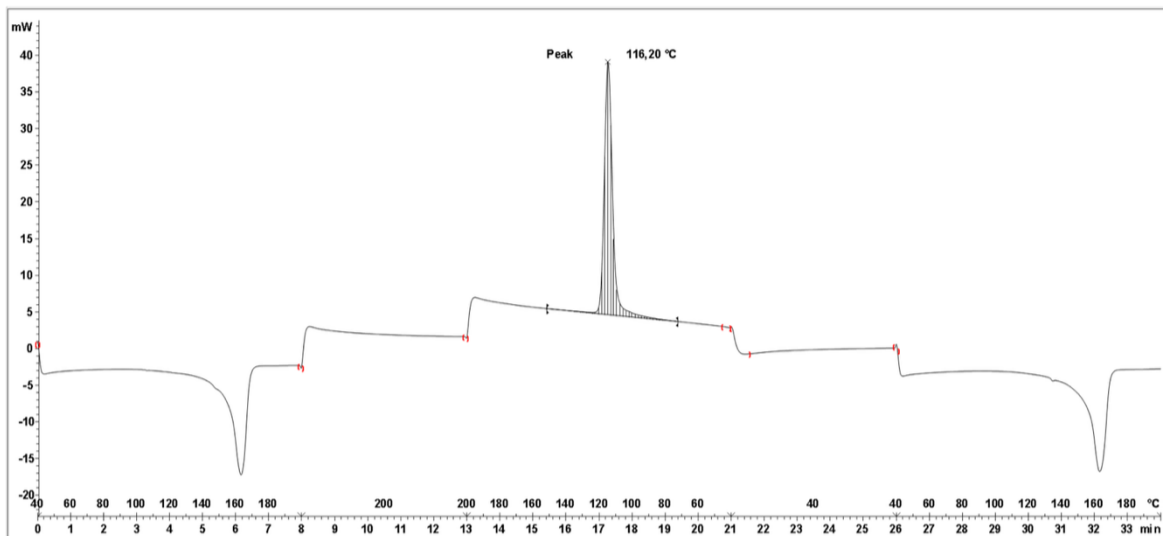
Termograma muestra 2



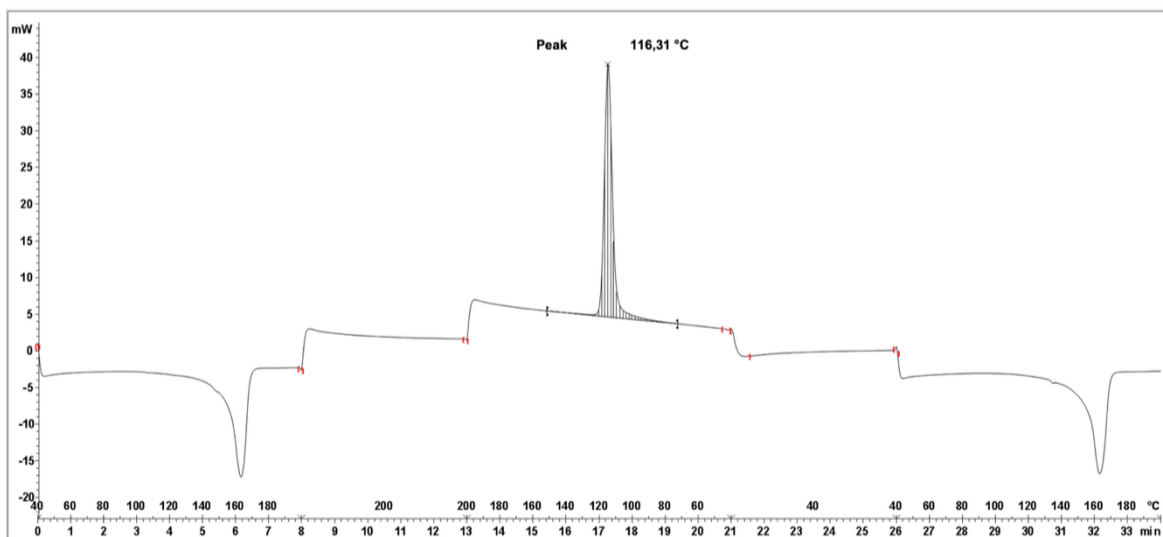
Aditivación al 2%

Muestra	Tc (°C)
1	116,2
2	116,3
promedio	116

Termograma muestra 1



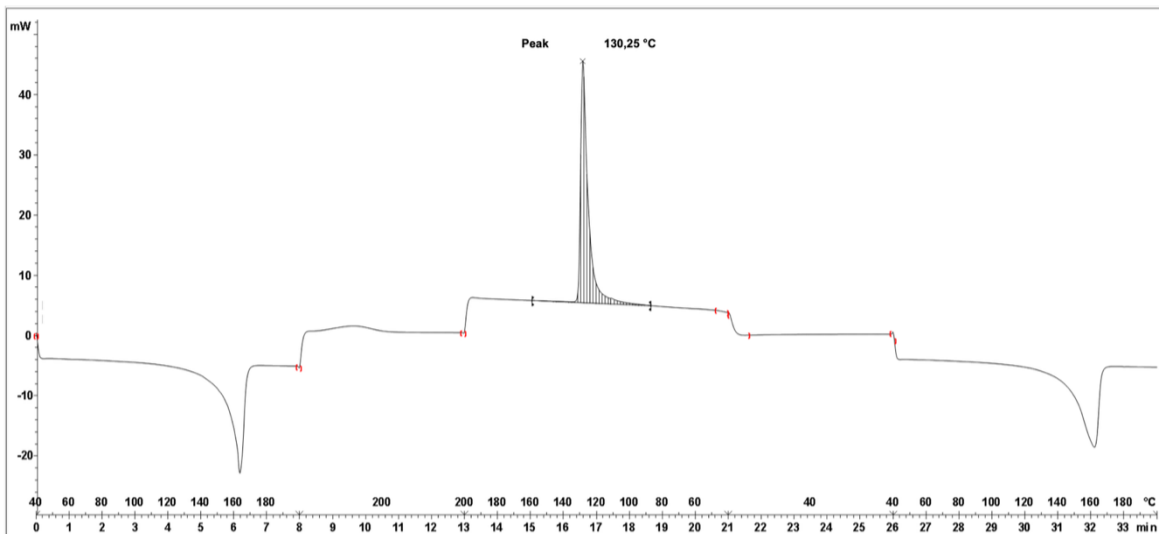
Termograma muestra 2



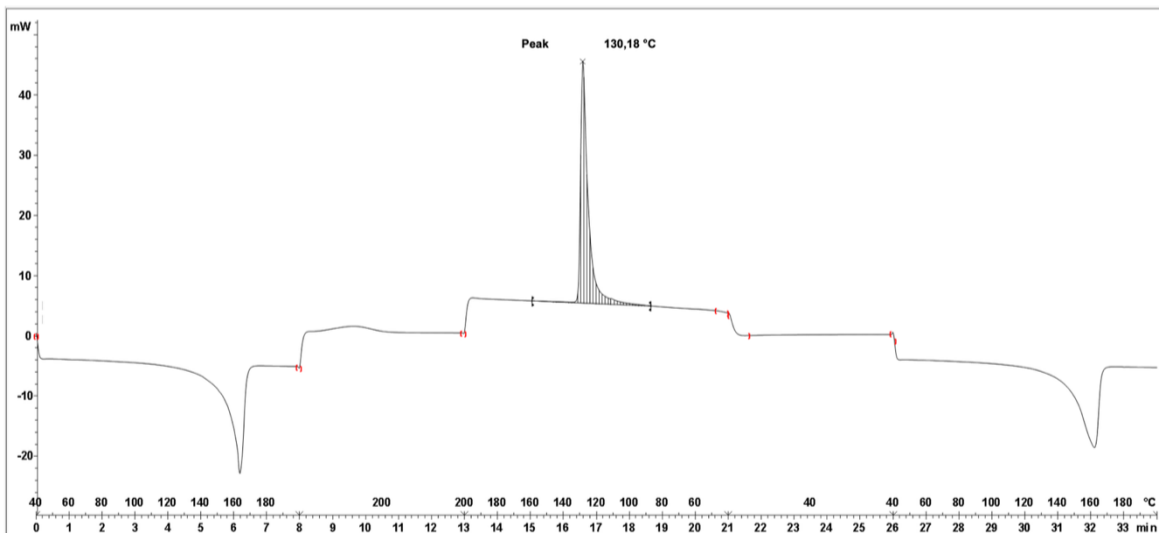
Aditivación al 3%

Muestra	Tc (°C)
1	130,2
2	129,9
promedio	130

Termograma muestra 1:



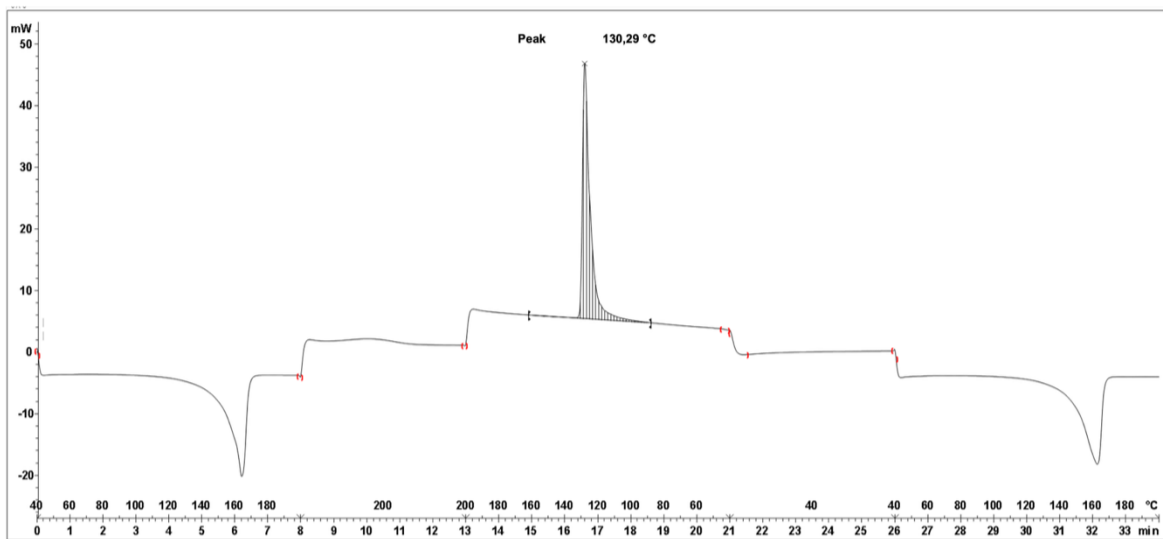
Termograma muestra 2:



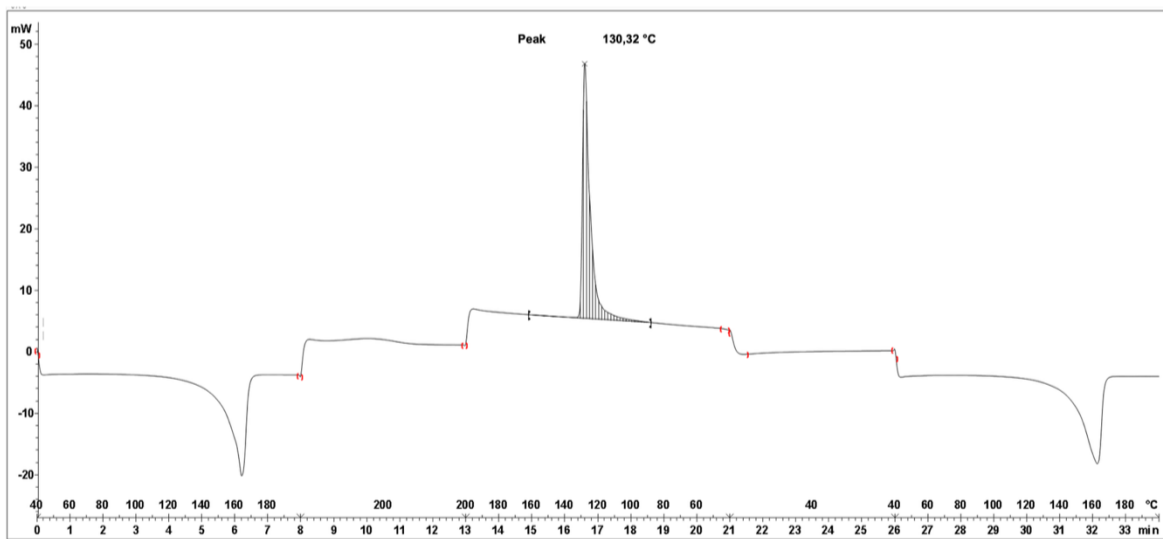
Aditivación al 4%

Muestra	Tc
1	130,3
2	130,3
promedio	130

Termograma muestra 1



Termograma muestra 2:



CAPÍTULO 3:
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 TEMPERATURAS DE CRISTALIZACIÓN

Se Realizó un análisis térmico a una muestra sin aditivación a fin de constatar la temperatura de cristalización del polímero sin efectos de nucleantes, dando como resultado una temperatura de 112°C, valor normal para estas características.

En la mezcla al 2% de aditivación, se observó un leve aumento en la temperatura de cristalización obteniendo 116°C como resultado.

En la tercera mezcla se observó un cambio significativo en el efecto del aditivo sobre la temperatura de cristalización dando como resultado 130°C. Igualmente se realiza una cuarta mezcla pero esta vez al 4% de benzoato de sodio logrando obtener una temperatura de cristalización de 130°C.

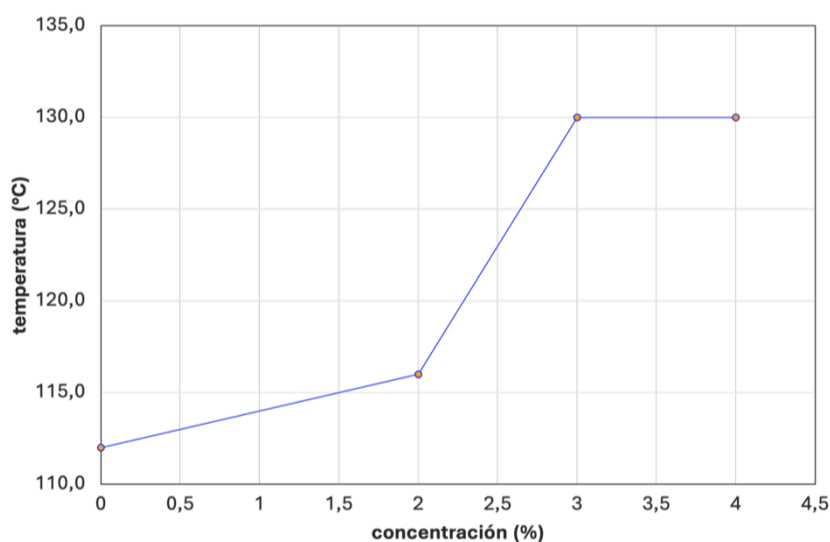


Figura 3-1: Efecto de la concentración de benzoato de sodio sobre la temperatura de cristalización

Para observar de mejor manera las diferencias entre muestras se superpusieron los termogramas como se muestra en la figura 3-2 y donde se aprecia que al trabajar con una aditivación al 3% se logra un gran aumento en la temperatura de cristalización y donde una aditivación al 4% obtiene el mismo resultado indicando que este es el punto máximo de efecto que logra el aditivo en el polímero.

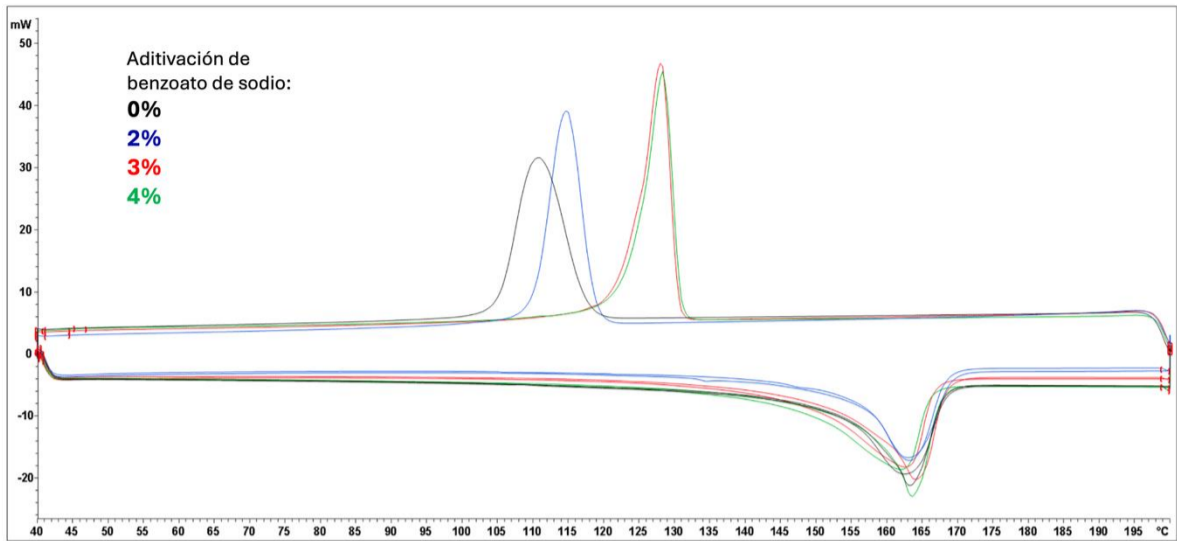


Figura 3-2: Comparación de termogramas a distintas concentraciones de benzoato de sodio

3.2 COMPARACIÓN DE NUCLEANTES

Se comparó termograma de polipropileno con aditivo comercial al 1% versus polipropileno aditivado con benzoato de sodio al 3%. Se puede observar en la figura 3.3 que ambas mezclas logran la misma temperatura de cristalización, comprobando que la aditivación del polipropileno con benzoato de sodio a una concentración del 3% logra el mismo efecto que una mezcla al 1% de aditivo comercial.

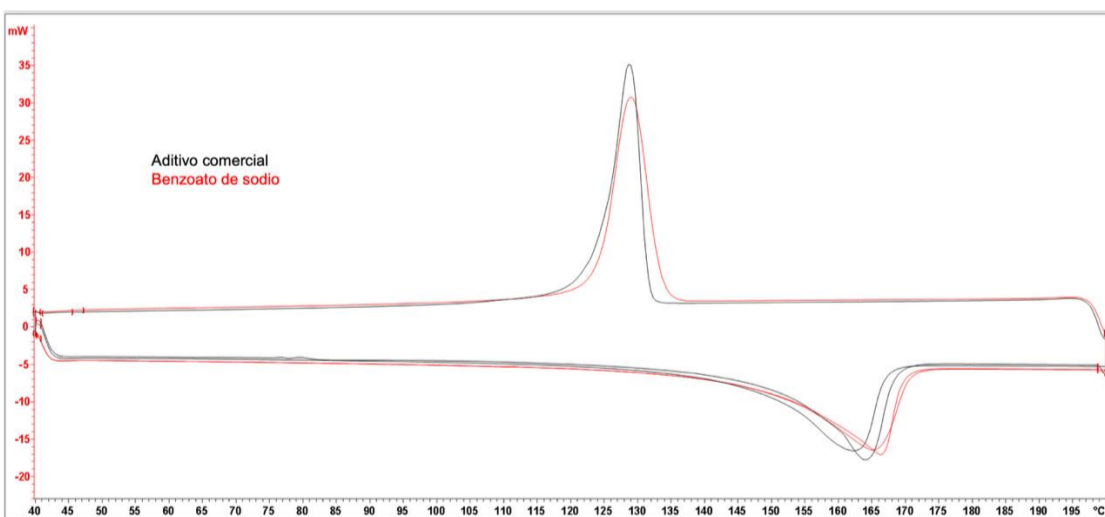


Figura 3-3: Comparación termogramas con aditivo comercial y benzoato de sodio

Este resultado sugiere que es posible realizar un eventual reemplazo del aditivo comercial por benzoato de sodio, a pesar de que las concentraciones son distintas y donde para lograr el mismo efecto que el aditivo comercial hay que ocupar una mayor cantidad de benzoato de

sodio, el costo de este último resultaría ser muy competitivo en comparación al aditivo comercial que actualmente es usado.

Considerando una aditivación al 3% de benzoato de sodio, por tonelada de polipropileno producido se ocuparían 30 Kg del aditivo y considerando que una tonelada del aditivo tiene un precio aproximado de 500US\$, el costo de producción por tonelada de polipropileno sería de 15US\$.

Comparativamente, el aditivo comercial de uso actual tiene un costo de producción por tonelada de polipropileno de 27US\$ por lo que el uso de benzoato de sodio en reemplazo de este último se torna muy atractivo, reduciendo significativamente el costo de producción por tonelada en un 44%.

3.3 IMPLICANCIAS EN EL TIEMPO DE CICLO DE PROCESAMIENTO EN LA INDUSTRIA TRANSFORMADORA

En el moldeo por inyección, la temperatura de cristalización influye directamente en el tiempo de ciclo, ya que el inicio más temprano de la cristalización reduce el tiempo necesario para alcanzar la rigidez estructural que permita el desmoldeo. Una mayor T_c permite disminuir el tiempo de enfriamiento del polímero en el molde, aumentando la productividad y reduciendo el consumo energético asociado al control térmico del sistema. Por el contrario, una T_c más baja obliga a prolongar la etapa de enfriamiento para evitar deformaciones significativas, tales como contracción diferencial y alabeo (“warping”), fenómenos propios del polipropileno por su alta contracción volumétrica cristalina.^[4]

En procesos de extrusión, una temperatura de cristalización elevada favorece una solidificación más rápida del fundido, lo cual mejora la estabilidad dimensional y permite incrementar la velocidad de línea. La solidificación retardada del polipropileno puede limitar el rendimiento productivo y aumentar los defectos asociados al colapso del perfil extruido^[5], especialmente en aplicaciones como tubería, perfiles y lámina. Del mismo modo, en termoformado, una T_c mayor contribuye a que la lámina recupere rigidez más rápidamente al salir de la zona de calentamiento, lo que favorece ciclos más cortos y una mejor uniformidad de espesores ^[6]

En síntesis, la temperatura de cristalización del polipropileno es un factor determinante en la eficiencia y calidad del procesamiento industrial. Una T_c más alta conduce, de manera consistente, a tiempos de ciclo más cortos, mejor estabilidad dimensional y mayor productividad, mientras que una T_c baja obliga a compensaciones térmicas que incrementan tiempos y costos. Desde una perspectiva de ingeniería de materiales, la optimización de la temperatura de cristalización mediante selección de resina y uso de aditivos nucleantes constituye una estrategia central para maximizar el desempeño del polipropileno en aplicaciones de alto volumen.

El beneficio en el ciclo de procesamiento al utilizar un material nucleado en comparación con uno no nucleado puede expresarse de manera directa en términos porcentuales, considerando principalmente la reducción del tiempo de enfriamiento y su impacto en el ciclo total.

En condiciones industriales típicas de moldeo por inyección de polipropileno, el uso de agentes nucleantes incrementa la temperatura y la velocidad de cristalización del material, lo que permite acortar el tiempo de enfriamiento entre un 10 y un 25 %. Dado que la etapa de enfriamiento representa aproximadamente el 50–70 % del tiempo total de ciclo, esta reducción se traduce en una disminución global del ciclo de procesamiento del orden del 8 al 15 %.

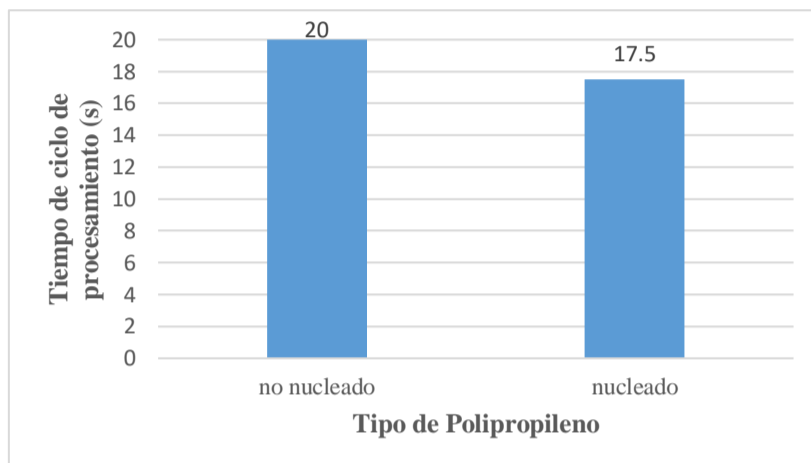


Figura 3-4: Comparación del ciclo de procesamiento de un polipropileno nucleado vs. no nucleado

En la figura 3.4 se puede apreciar una comparación del ciclo de procesamiento en la industria transformadora de un polipropileno nucleado versus uno no nucleado, y en donde se distingue que el material no nucleado presenta un tiempo de ciclo de referencia de 20 segundos y en donde el material nucleado muestra un ciclo reducido a aproximadamente 17,5 segundos. Esta diferencia representa una reducción del ciclo cercana al 12–13 %, atribuida principalmente a la disminución del tiempo de enfriamiento por el aumento de la temperatura de cristalización del material concluyendo así que el uso de un material nucleado permite reducir de forma significativa el tiempo total de ciclo de procesamiento en comparación con un material no nucleado. En el ejemplo mostrado, la disminución del ciclo es del orden del 12%, lo que se traduce directamente en un aumento proporcional de la productividad del proceso sin necesidad de modificaciones en el equipo o el molde ni en los parámetros generales de operación. Por lo tanto, el empleo de materiales nucleados proporciona un beneficio porcentual claro y medible en el ciclo de procesamiento, con impacto directo en la eficiencia y competitividad del proceso de fabricación

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el polipropileno sin agente nucleante presenta una temperatura de cristalización cercana a los 112 °C. La adición de benzoato de sodio al 3% produce un incremento significativo de la Tc, alcanzando valores iguales a los que presenta el aditivo comercial.

El aditivo comercial al 1% peradquisicionmitió alcanzar temperaturas de cristalización de 130 °C, al igual que el benzoato de sodio pero al 3%, pero suficiente para generar una reducción apreciable en los tiempos de ciclo.

Desde un punto de vista productivo, el aumento de la Tc obtenido con benzoato de sodio permitiría reducir los tiempos de enfriamiento, incrementando la productividad sin incurrir en los costos asociados a nucleantes comerciales de mayor precio.

El benzoato de sodio logra un desempeño a un 3%, pudiendo deberse a que se trata de benzoato de sodio de grado laboratorio, no industrial, lo cual supone que la concentración pudiese ser mas baja si se trabaja con este tipo de benzoato industrial.

Desde el punto de vista de desempeño de aumento de temperatura de cristalización, el benzoato de sodio representa una alternativa viable para sustituir el aditivo comercial que presenta un valor mayor de adquisición reduciendo el costo de fabricación en un 44%.

En la industria transformadora, el uso de polipropileno nucleado versus uno no nucleado significaría una reducción en el tiempo de ciclo de procesamiento de una pieza cercana al 12% lo que se traduce en mayor productividad por unidad de tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to polymers* (3rd ed.). CRC Press.
- [2] Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [3] Hancock, M., & Sharp, J. (2009). *Nucleating agents in polypropylene*. *Journal of Applied Polymer Science*, 112, 1–12.
- [4] Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2000). *Injection Molding Handbook*. Springer.
- [5] Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2013). *Principles of Polymer Processing* (2nd ed.). Wiley.
- [6] Throne, J. L. (2012). *Technology of Thermoforming*. Hanser.