



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA
PELICULA FLEXIBLE EMPLEADA PARA EL
ENVASADO A VACÍO DE CARNE DE RES
CONGELADA.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A

López Aguado Parrales Luz Elisa

**ASESORES: M. en C. Rosalía Meléndez Pérez
Dr. José Luis Arjona Román**

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis papis:

Deria: por tu presencia discreta pero constante, TE AMO!

Viejito.....Una vez tiempo atrás, mire al cielo y te pensé, desde entonces y para siempre, eres y serás todo mi cielo (recuerdas...verano 2004).

.....

A mis asesores y amigos:

Dr. Arjona: gracias por enseñarme a fomentar mi temple y seguridad, su dureza me enseñó a estimarlo más....de una inútil que lo quiere mucho!

Rosalía: Te agradezco todo el apoyo que me has brindado en todos aspectos, gracias porque siempre has tenido tiempo para mí, como asesora y como amiga, tqm.

.....

Maestra Zambrano, gracias por su apoyo durante la realización de este proyecto.

Maestra Cortazar....pues nunca se me hizo tomar clase con usted.....pero gracias por permitirme conocerla!

Maestro Vivaldo...gracias por tener tantas muestras de afecto "PARA ELISA"...desde el año 2000 a la fecha!

A mis ángeles:

Tía Lucy: para ser Lucifer eres el mejor ángel de la guarda, gracias por tu presencia en mi vida y tu apoyo incondicional.

Tíos Goya y Raúl: gracias por su amor y amistad, los amo por cada palabra de aliento que han tenido para mí.

Maria: gracias por ser tú, amorosa y dura...tuve suerte me toco tener dos madres!

Manina Lety: Mil gracias y besos por tu amistad y cariño y por permitirme luchar junto contigo.

A mis hermanos todos, porque de cada uno he tomado un poco para tratar de crecer como persona todos los días, Lili, Güero, Gabriel y Carlos.

Charly: gracias por ser mi ángel de la guarda de tiempo completo, tu presencia es clave en mi vida....mil gracias por permitirme aprender tanto de ti; t@ps!

A mis primos divinos de quienes he aprendido muchísimo, gracias por todo su amor, Mónica, Arturo, Licho, Bibi y Rosalía.

A los hermanos que escogí y amigos para siempre:

Gracias por permitirme aprender de ustedes, cuidarme, quererme y jalarme las orejas cuando ha sido necesario en su personal estilo, gracias por ser un motor en mi vida; Mauricio, Nanielito, Sandia, Ulises, Marisol, Ady, Pao, Matuz, Rana, Diane.

China, gracias por explicarme la teoría de los emulsificantes, tú sabes! A eso le debo gran parte de mi felicidad y más gracias por alentarme con esa sonrisa que siempre te acompaña amiga, deseo que siempre nos tengamos una a la otra.

Raquel, te quiero y te admiro mucho, gracias por tu amistad, he aprendido mucho de ti y espero compartamos muchos logros más.

A todos aquellos que de manera muy directa e indirecta me apoyaron en este proyecto aunque nuestras vidas sean distintas.

Índice

Introducción	10
Capítulo I: Antecedentes	12
1.1 Importancia del envasado de alimentos	13
1.2 Envasado a vacío	14
1.2.1 Envasado a vacío de carne	15
1.2.2 Conservación de carne envasada	16
1.3 Congelación	16
1.3.1 Cambios durante la congelación de la carne	19
1.3.2 El proceso de congelación	21
1.4 Materiales de envasado	22
1.4.1 Propiedades y funcionalidad del polietileno	24
1.4.2 Propiedades y funcionalidad del nylon 6-6	25
1.4.3 Propiedades mecánicas en películas flexibles de envasado	25
1.4.3.1 Ensayos mecánicos en polímeros	26
1.4.3.2 Módulo de Young	30
1.4.3.3 Arrastre y fuerza de relajación	30
1.5 Propiedades térmicas	31
1.5.1 Transiciones físicas en sistemas poliméricos	31
1.5.2 Ensayos térmicos	32
Capítulo II: Metodología experimental	35
2.1 Cuadro metodológico	37
2.2 Descripción del cuadro metodológico	38
2.2.1 Actividades preliminares	38
2.2.2 Actividades Generales	39
Capítulo III: Resultados y Discusión	42
3.1 Actividades preliminares	43
3.1.1 Caracterización de túnel de congelación por aire forzado	43
3.2 Montaje de técnicas	44
3.2.1 Montaje del ensayo mecánico de la muestra para la determinación de la tensión máxima	44
3.2.2 Montaje de ensayo térmico por MDSC	46
3.2.3 Selección de condiciones de envasado	47
3.3 Ensayos mecánicos	47
3.3.1 Ensayos mecánicos en muestras de película flexible multicapa y polietileno de baja densidad	48
3.4 Análisis Térmico	50
3.4.1 Análisis térmico de -60 °C a 300 °C	50
3.4.2 Análisis térmico de polietileno de baja densidad	52
3.4.3 Enfriamiento de la película flexible multicapa a -40 °C con una	54

	isoterma de 10 minutos	
3.5	Resultados del comportamiento mecánico de la película flexible multicapa empleada para envasado y congelación	57
3.6	Resultados de evaluación térmica de la película flexible multicapa empleada para envasado y congelación	60
	Conclusiones	68
	Referencias bibliográficas	70

Índice de tablas

1	Tipos de congelación en función a la velocidad de congelación	17
2	Métodos de congelación de carne	17
3	Puntos de congelación para algunos grupos de alimentos	18
4	Valores de permeabilidad del polietileno de baja densidad y el nylon 6-6	25
5	Propiedades generales de los materiales plásticos más empleados	34
6	Características del túnel de congelación por aire forzado	43
7	Niveles de variación para el montaje del ensayo mecánico de tensión	46
8	Valores promedio obtenidos del ensayo mecánico para la película flexible multicapa y el polietileno de baja densidad	49
9	Condiciones de descongelación para las muestras envasadas a vacío	56
10	Valores promedio obtenidos del ensayo mecánico para las muestras congeladas y descongeladas	58
11	Entalpías de fusión para cada una de las muestras de la película flexible multicapa	65

Índice de figuras

1	Clasificación general de películas empleadas en el envasado de alimentos	23
2	Imagen de una máquina universal INSTRON	28
3	Curva típica de comportamiento elástico de polímeros	29
4	Representación de un ensayo por MDSC	33
5	Túnel de congelación por aire forzado	43
6	Disposición de charolas para la medición de perfil de velocidades	44
7	Probeta empleada para ensayos mecánicos de tracción	45
8	Disposición para el corte de muestras	45
9	Comparativo de caracterización mecánica entre película flexible multicapa y polietileno de baja densidad	48
10	Análisis térmico de película flexible multicapa calentamiento de -60 °C a 300 °C	50
11	Requerimientos energéticos durante el calentamiento de la película flexible multicapa de -60 °C a 300 °C	51
12	Comparativo del análisis térmico con polietileno de baja densidad (tipo	52

	ziplock) calentamiento de -60 °C a 300 °C	
13	Comparación en capacidad calorífica, calentamiento de -60 °C a 300 °C	53
14	Enfriamiento de la película flexible multicapa a -40 °C con una isoterma de 10 min	54
15	Muestras congeladas y envasadas al vacío en la película flexible multicapa	55
16	Muestra descongelada a temperatura de refrigeración	56
17	Muestra descongelada por inmersión en H ₂ O	56
18	Muestra descongelada a temperatura ambiente	56
19	Porcentaje de fuerza consumida (Módulo de Young) de las muestras descongeladas	59
20	Comparativo de análisis térmico de las muestras descongeladas por diferentes métodos	61
21	Comparativo de capacidad calorífica de las muestras descongeladas por diferentes métodos	62
22	Comparativo de capacidad calorífica para todas las muestras	63
23	Comparativo global de flujo de calor total para cada una de las muestras	64

INTRODUCCIÓN

Actualmente los métodos de envasado cobran gran importancia a nivel industrial, sin embargo, cabe aclarar que la eficacia de este tipo de materiales se encuentra sujeta a las propiedades inherentes a éstos, tales como hermeticidad, resistencia mecánica y térmica principalmente, es por ello, que para determinar la funcionalidad de un envase, se requiere de la realización de ciertos ensayos que permitan simular el comportamiento de éste una vez que haya sido incorporada la materia a conservar; éste tipo de ensayos son considerados como pruebas de control de calidad, los cuales determinarán si la película flexible es o no apta para resistir a las condiciones mecánicas y de almacenamiento por las cuales transitará a lo largo de la cadena de comercialización.

Al diseñar un sistema de envasado aplicado a la industria en alimentos, es importante considerar todos aquellos factores que en conjunto determinarán la vida útil del producto preservando así sus atributos de calidad. Aunque existen múltiples métodos de conservación de alimentos, cabe mencionar que los más empleados, al menos en la materia del presente trabajo, en productos cárnicos implican la conservación por frío, como la refrigeración y la congelación; sin embargo, a pesar de la factibilidad de estos métodos, en ocasiones generan efectos indeseables en los productos cuando estos se aplican de forma incorrecta, es por ello, que ante la necesidad de preservarlos de la mejor forma, surgen nuevas técnicas y materiales de envasado así como la aplicación del vacío en un sinfín de películas plásticas que en combinación con inyección de gases y/o el almacenamiento a bajas temperaturas son capaces de retardar cambios degradativos en la carne y sus derivados.

A través de éste proyecto se estudió la relación entre el uso de un material flexible destinado para el envase a vacío de cortes de carne y el almacenamiento en condiciones de congelación, con el fin de relacionar el comportamiento del material a lo largo de ésta etapa una vez que este fue empleado para los fines que fue diseñado, considerando que existen pocos estudios sobre productos envasados de esta forma, almacenados a temperaturas bajo cero. Es por ello, que se considera este enfoque como una alternativa para la conservación de alimentos, tomando como ejemplo representativo el envasado de carne fresca, uno de los principales sistemas alimenticios envasados a vacío.

1. ANTECEDENTES

1.1 Importancia del envasado de alimentos

Existen diferentes factores en la elección de un envase destinado para la protección de los alimentos; sin embargo, uno de los más importantes se basa en ofrecer al consumidor un producto con características semejantes a las que ofrece un producto fresco o recién preparado, cuya vida útil se extienda a periodos largos de almacenamiento. Para lograr tales fines, es necesario conocer las propiedades específicas del producto que desea ser envasado, mientras que por el lado del envase, es necesario conocer las condiciones climáticas y mecánicas a las que será sometido el producto terminado a lo largo de la cadena de distribución. Por lo anterior es necesario considerar la compatibilidad producto-envase para garantizar la conservación e inocuidad del alimento (Heiss, R., 1978).

Con algunas excepciones, la mayoría de los alimentos experimentan una pérdida en su calidad durante la etapa de almacenamiento, lo cual se refleja en cambios de textura, color y sabor, sin embargo estos cambios desfavorables pueden ser minimizados con sistemas de envasado adecuados y diseñados para contrarrestar los factores extrínsecos al alimento que conllevan a su deterioro (Eskin, M., 2001). En lo que respecta a las características del material de envase, existen factores, como la absorción de humedad y los cambios de temperatura que determinan la estabilidad de las películas plásticas de envasado. Cuando este tipo de materiales son expuestos a aumentos y descensos de temperatura, se genera una reducción en la resistencia a la tensión debido a un proceso de plastificación lo que en conjunto modifica las propiedades mecánicas de este. Esto puede suceder al almacenar en congelación y posteriormente descongelar a temperatura ambiente un alimento.

El almacenamiento de alimentos envasados implica el uso de bajas temperaturas y la interacción entre el material de envase y el alimento, por contacto directo o indirecto, con exudados líquidos, se generan cambios de pH en el producto que finalmente modifican parcialmente las características de los materiales (Holm, K., Ndoni, S. y Risbo, J., 2006).

1.2 Envasado a vacío

El envasado a vacío es un método importante a nivel industrial, ya que es considerado uno de los más eficaces para mantener la calidad de productos alimenticios, con una barrera apropiada contra el oxígeno, excluyendo el aire e inhibiendo el crecimiento microbiano y prolongando la vida útil.

El envasado a vacío produce una presión diferencial entre el interior y el exterior del envase, requiriéndose como mínimo 610 mm de Hg para lograr el vacío; la presión parcial de la atmósfera del interior de los envases determina el tipo de microorganismos que se desarrollan sobre el alimento, debido a la relación que guarda la presión con la temperatura. Cabe mencionar que el metabolismo microbiano, a su vez, es responsable de modificar la atmósfera del interior del envase. (Effenberger, E., 2000).

El proceso de envasado a vacío no está indicado para productos blandos ya que provoca una deformación irreversible del producto, se reduce, bajo condiciones adecuadas el contenido de oxígeno al 1%, y en productos cárnicos provoca un cambio en el color, lo que provoca la acumulación de exudados durante el almacenamiento (Anónimo. Empaque performance No. 196. México 2007).

Existen otros sistemas que combinan la inyección de gases con el envasado a vacío, generalmente luego de que se logra el vacío en el sistema, se llena con gas inerte, que sustituye al aire. Este sistema diluye el oxígeno residual en el envase. Cuando se utiliza gas inerte como nitrógeno, el gas funciona como un protector que rodea al alimento. Algunos sistemas utilizan gases reactivos como CO₂ para obtener un nivel de protección adicional.

En términos generales, las ventajas del envasado al vacío son las siguientes:

- ✓ Mejora el color
- ✓ Mejora la apariencia de la carne
- ✓ Mejora la textura
- ✓ Alarga la vida de anaquel

Respecto al equipo empleado para el envasado a vacío de alimentos, básicamente se emplean dos equipos:

- 1) La cámara de vacío
- 2) El tubo de vacío

La cámara de vacío o campana es la más empleada debido a que la velocidad de envasado es mayor respecto al tubo de vacío, y lo más importante es que representa menores costos; dicha cámara consiste en un recipiente metálico con una tapa de metacrilato transparente en la que se coloca el alimento a envasar, previamente introducido en una bolsa o película flexible (Coles., R., McDowel, D. y Kirwan, M., 2004).

1.2.1 Envasado a vacío de carne

Se piensa que el envasado como medio de conservación aplicado en carne representa un avance sobre los métodos antiguos desde el punto de vista microbiológico. Desde 1960, el envasado a vacío es una de la técnicas más comunes para envasar carne fresca (Tewari, G., Jayas, D., y Holley, R., 1999). En carne fresca debe apreciarse una superficie de color rojo brillante, por ello cuando ésta es envasada, deben usarse películas que permitan la formación y conservación de una capa de mioglobina sobre la superficie de la misma, además que en el caso de la industria cárnica, dichos materiales de envase también se enfocan a preservar la calidad higiénica de éste tipo de productos (Pérez, D. y Andujar, G., 2000).

Blixt y Borch (2002), trabajaron en carne de cerdo y res envasada a vacío y determinaron que los cambios existentes no fueron en aumento en carga microbiana, sino en los cambios en el pH de los productos.

Durante el proceso de envasado es importante que la película plástica flexible quede en íntimo contacto con la carne para evitar pliegues en la película de envase, los cuales conllevan al exudado, y por consiguiente pérdidas de peso (Moron, O. y Zamorano, L., 2003).

1.2.2 Conservación de carne envasada

Existen diferentes métodos para la conservación de la carne, dentro de los cuáles se encuentran, procesos como:

- Esterilización de enlatados
- Deshidratación
- Curado por medio de agentes químicos
- Ahumado
- Refrigeración
- Congelación

Siendo estos dos últimos los de mayor importancia y aplicación (Farchmin, G., 1965).

La conservación de la carne y sus derivados por medio de frío es el método más empleado para mantener los parámetros de calidad del producto por mayores periodos de tiempo, comparado con otros métodos de conservación (Spiau, J., 1981).

1.3 Congelación

Desde el punto de vista termodinámico, la congelación es un proceso mediante el cual se elimina calor sensible del alimento hasta llegar a la eliminación de calor latente, para así iniciar con la formación del primer cristal de hielo, y una vez que el centro térmico haya alcanzado la temperatura de congelación deseada deja de eliminarse calor sensible.

Técnicamente la congelación es una operación unitaria en la que la temperatura del alimento se reduce por debajo de 0 ° C, con lo que una proporción elevada del agua contenida cambia de estado formando cristales de hielo. La inmovilización del agua en forma de hielo y el aumento de la concentración de los solutos en el agua no congelada reduce la actividad del agua del alimento, lo que conlleva al retardo de las reacciones de deterioro en el alimento debido a la presencia de enzimas y/o microorganismos (Fellows, P., 2000).

Existen cuatro tipos de congelación básicos clasificados en función a la velocidad de congelación, los cuales se describen en la tabla 1:

Tabla 1. Tipos de congelación en función a la velocidad de congelación

TIPOS DE CONGELACIÓN	VELOCIDAD (m/s)
LENTA	$<1.38 \times 10^{-6}$
RAPIDA	1.38×10^{-6}
MUY RÁPIDA	2.77×10^{-5}
ULTRARÁPIDA	2.77×10^{-4}

FUENTE: Tscheuschner, D., 2001

Los tipos de congelación de mayor aplicación en carne son los dos primeros y se combinan con los siguientes dos métodos en función a la temperatura del medio, tal cual se expresa en la tabla 2:

Tabla 2. Métodos de congelación de carne

METODO DE CONGELACIÓN	TEMPERATURA ° C	EQUIPO
Por corriente de aire frío	-30 ° C hasta -40° C	Túnel o cámara de congelación
Por contacto directo	-45° C	Congelador de placas

FUENTE: Spiau, J., 1981

Los alimentos congelados más importantes para fines comerciales son:

- Frutos (fresas, naranjas, cerezas, así como jugos y concentrados derivados)
- Hortalizas (espinaca, papa, brócoli)
- Productos marinos (camarones, pescado fresco, pellets de pescado y platillos preparados)
- Carne (cerdo y res en canal, cortes y alimentos preparados)
- Alimentos preparados (pizzas, pasteles, pies y comidas completas)
- Productos pecuarios (huevo)

En función del contenido de humedad, los alimentos presentan diferentes puntos de congelación, algunos son mostrados en la tabla 3:

Tabla 3. Puntos de congelación para algunos grupos de alimentos

ALIMENTO	CONTENIDO DE HUMEDAD %	PUNTO DE CONGELACIÓN °C
Hortalizas	78-92	-0.8 a -2.8
Frutos	87-95	-0.9 a -2.8
Carne	55-70	-1.7 a -2.2
Pescado	65-81	-0.6 a -2.0
Leche	87	-0.5
Huevos	74	-0.5

FUENTE: Fellows, P., 2000

Los alimentos congelados representan productos de alta calidad, particularmente en el rubro de frutos/vegetales y carne por encima de productos enlatados y deshidratados. La distribución de alimentos congelados representa costos altos debido a la importancia de la cadena de frío. De forma ideal, el producto congelado debe mantener su temperatura de congelación constante hasta la comercialización, pero en la práctica, un producto bajo éstas condiciones, solamente es mantenido a la temperatura deseada por periodos máximos de 24 horas, puesto que al llegar a los centros de distribución para su almacenamiento, la temperatura ya ha fluctuado (Fellows, P., 2000).

En lo que se refiere a la congelación de productos cárnicos, este método es aplicable a los siguientes productos:

- Carne fresca en canal
- Carne fresca en cortes
- Hígado y otras vísceras
- Platillos listos para consumo

A excepción de la congelación en canal, tanto los productos congelados en fresco (cortes) como alimentos preparados son envasados en materiales flexibles diversos, sin embargo aún no existen muchos estudios sobre la viabilidad de congelar productos cárnicos envasados en

materiales flexibles y además al vacío, generalmente los alimentos envasados por éste método suelen ser almacenados en refrigeración, por lo que se desconoce a profundidad el comportamiento de películas de envasado expuestas a temperaturas de congelación, esto puede ser atribuido a todos aquellos cambios desfavorables a consecuencia del proceso de congelación.

1.3.1 Cambios durante la congelación de la carne

La congelación es un sistema de conservación que puede llegar a afectar en cierto grado algunos atributos sensoriales en la carne, los cuales se deben a reacciones de lipólisis y oxidación de los ácidos grasos libres de la carne, dichas reacciones comienzan con la hidrólisis de fosfolípidos a nivel membrana, si dichas reacciones tienen lugar antes de la congelación, prevalecen durante la formación de cristales de hielo (Casp, A., 1999).

Dentro de los principales cambios indeseables que tienen lugar en la carne congelada se encuentran:

➤ **Daños mecánicos**

Se deben al aumento de volumen cuando se congela el interior de la pieza de carne, lo cual puede generar altas presiones internas hasta llegar a conseguir la ruptura violenta en el tejido superficial de la carne; los daños mecánicos debidos a la migración de agua son atribuidos a la velocidad de congelación, puesto que este es un factor determinante en la forma en que se da la cristalización, intracelular o extracelular, en el primero de los casos, las células se deshidratan debido al flujo osmótico de agua que sale de su interior hacia la superficie, al final esta migración deriva en la ruptura de las membranas celulares.

➤ **Cambios de textura**

Disminuyen potencialmente la calidad de la carne, dichos cambios se deben al fenómeno de recristalización progresivo, el cual le confiere a la carne un aspecto vítreo. Los cambios de textura pueden evitarse empleando métodos de congelación rápida.

➤ **Cambios de sabor**

Los lípidos son los principales responsables de esta propiedad sensorial, debido a reacciones de oxidación de materia grasa antes de la congelación, la reacción seguirá actuando durante el almacenamiento de la carne.

➤ **Cambios de color**

Generalmente se deben a lesiones por frío, las cuales se hacen presentes por medio de la aparición de manchas pardas en las carnes rojas que experimentan deshidratación superficial. Este tipo de cambios se atribuyen a la oxidación de la mioglobina, el principal pigmento de la carne, de hecho la velocidad a la que se da este tipo de reacción se debe principalmente a la temperatura de almacenamiento, aunque también existe un fenómeno de fotooxidación debido a la presencia de luz.

Por otro lado las reacciones lipolíticas también generan cambios de color indeseables tales como tonalidades grisáceas en la carne fresca.

➤ **Pérdidas de agua**

Se deben al cambio de fase que sufren los cristales de hielo que se generan en la periferia del producto, cuando el hielo se sublima. Se genera un fenómeno de deshidratación superficial e irreversible que a su vez favorece las reacciones oxidativas mencionadas.

La pérdida de humedad se da por la remoción del contenido de agua en la superficie, y el fenómeno prevalece en tanto mayor sea la temperatura de almacenamiento, ya que en la superficie del producto la presión parcial del vapor de agua aumenta con la temperatura aún cuando la carne se encuentre envasada.

Dependiendo del tipo de envase de los productos cárnicos congelados es posible reducir considerablemente estas pérdidas de agua que también se ven favorecidas debido a

fluctuaciones de temperatura que dan lugar a la formación de escarcha sobre el producto (Casp, A.,1999).

➤ **Cambios de pH**

Están íntimamente relacionados con las pérdidas de humedad y por consecuencia con la capacidad de retención de agua en la carne, ya que esta propiedad se ve favorecida cuando el pH final del producto congelado aumenta respecto del pH inicial, es por ello, que bajo estas condiciones, el potencial de jugos exudados durante la descongelación disminuye. Sin embargo, durante el proceso de descongelación, dependiendo del método empleado, también tienen lugar algunas modificaciones sobre las características de la carne, así como en las propiedades del material que lo contiene (Genot, C., 2003).

1.3.2 El proceso de descongelación

Del proceso de descongelación dependen algunos parámetros de calidad en la carne, regularmente el método de descongelación esta en función del destino de la carne, para dichos fines, pueden generalizarse tres tipos de descongelación en función al tipo de proceso subsecuente:

- I. Descongelación por cocción: Se aplica cuando el producto es descongelado para su consumo inmediato, por ejemplo a nivel doméstico. En tal caso, la carne se cuece sin estar totalmente descongelada, y por esta razón, la textura del producto cambia desfavorablemente.
- II. Descongelación parcial: se aplica a piezas individuales con fines de envasado especial y es provocada por un aumento en la temperatura hasta -5 °C, aún hay presencia de hielo; sin embargo, la textura es suficientemente blanda para hacerlo un producto manejable.
- III. Descongelación para transformación: éste método básicamente hace referencia a aquellos procesos en que durante la elaboración de productos picados (salchichas, pastas, jamones, etc.) la carne se descongela al tiempo que es triturada o troceada,

aprovechando así la presencia de hielo, ya que éste favorece la formación de la emulsión cárnica en productos picados.

Durante el proceso de descongelación es apreciable una pérdida considerable de componentes líquidos, es por ello que se recomienda un proceso de descongelación lento; sin embargo, cuando se requiere de la descongelación de grandes piezas de carne como medias canales, es necesario reducir el tiempo de descongelación (Girard, A., 1991).

Los problemas de descongelación surgen cuando en esta etapa se eleva la temperatura (por ejemplo a temperatura ambiente), y por otro lado, reducir tiempos de descongelación favorece la reproducción de microorganismos en la superficie de la carne, es por ello, que lo más recomendable es elevar la temperatura hasta 15 °C con circulación de aire elevada. Bajo estas condiciones la descongelación se agiliza.

Las modificaciones desfavorables ya mencionadas en carne almacenada en congelación, se contrarrestan al envasar a vacío previo al almacenamiento, principalmente se evitan las pérdidas de agua, problema más común en alimentos congelados (Genot, C., 2003).

1.4 Materiales de envasado en productos cárnicos

Existe una gran variedad de materiales flexibles empleados para carne fresca, procesada y congelada y se denominan envases flexibles debido a que están formados por una o varias láminas de material polimérico sellado, el uso de este tipo de películas representa ventaja sobre el uso del vidrio, metal y papel, debido a su gran versatilidad, propiedades estructurales, mecánicas y térmicas, entre otras (Eskin, M., 2001).

En la figura 1 se muestra la clasificación general de materiales flexibles empleados para el envasado de productos cárnicos dada en función de los compuestos químicos de los que provienen:

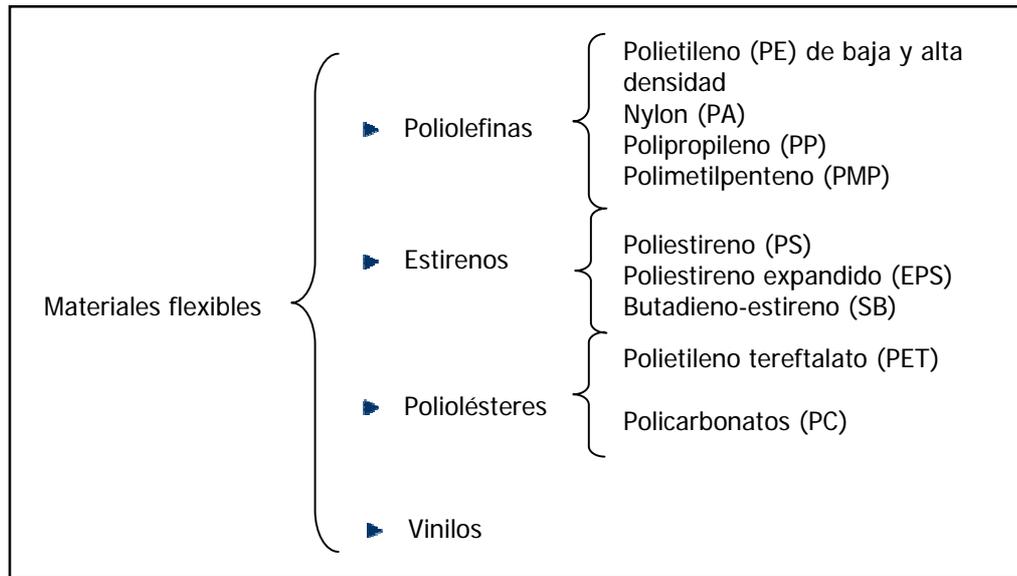


Figura 1. Clasificación general de películas empleadas en el envasado de cárnicos (Combellick, W., 1985).

En función a su estructura, existen básicamente dos tipos de películas flexibles empleadas para el envasado a vacío:

- ⊙ monocapa
- ⊙ multicapa

Para la fabricación de un envase flexible se requiere de un proceso de conversión que se logra por cualquiera de las siguientes operaciones:

- i. EXTRUSIÓN: se emplea para fabricar láminas y hojas (películas monocapa) de materiales termoplásticos.
- ii. COEXTRUSIÓN: son extraídas simultáneamente varias capas de resinas plásticas formando una sola lámina de estructura multicapa.
- iii. LAMINACIÓN: en este proceso un substrato es adherido a otro mediante aplicación de adhesivos.

Dentro de las características que debe reunir una película flexible destinada para el envasado a vacío, se consideran las siguientes:

- Permeabilidad al oxígeno
- Permeabilidad al vapor de agua
- Hermeticidad
- Resistencia mecánica
- Resistencia térmica

Los envases flexibles multicapa obtenidos por coextrusión, generalmente están compuestos por polietileno de baja densidad y poliamida (nylon 6-6), ya que debido a sus propiedades, son polímeros funcionales para cubrir las características ya mencionadas. A continuación, las propiedades de éstos:

1.4.1 Propiedades y funcionalidad del polietileno

El polietileno es un polímero cristalino al 70 %, que se clasifica de acuerdo a su densidad, LDPE y HDPE, baja y alta, respectivamente. El polietileno es insoluble en agua y prácticamente no es capaz de absorber ésta, es poco permeable al oxígeno.

En ausencia de oxígeno, el polietileno es estable hasta 290 °C, se descompone arriba de 350 °C generando polímeros de peso molecular más bajo (ceras). Se trata de un material traslúcido obtenido por extrusión con excelente capacidad de resistencia a la tensión, altamente extensible y flexible. Uno de los principales atributos del polietileno es su capacidad de fusión entre sí mismo, por ello, al conformar una película multicapa para envasado, su función tiene lugar en los extremos del envase, aunado a que al estar presente de esta forma, facilita la promoción y descripción del producto que contiene, ya que el polietileno también se caracteriza por ser altamente imprimible.

Todas las propiedades mecánicas del polietileno son sensibles a su historia térmica, su antecedente térmico determina que se vuelva más flexible y/o elástico, lo que genera que pueda acumular esfuerzos (Quiroga, G., 1995).

1.4.2 Propiedades y funcionalidad de nylon 6-6

El nylon 6-6 es una película muy clara y traslúcida al igual que el polietileno, pero esta poliamida pertenece a la familia de los termoplásticos semicristalinos sintetizada a partir de aminas y ácidos alifáticos. El nylon 6-6 está compuesto por dos diaminas y diácidos y es altamente deslizante, de alta resistencia química y mecánica, e inflamable. Esta lámina presenta buenas propiedades de barrera (permeabilidad) al oxígeno y otros gases, sin embargo es muy pobre al vapor de agua, esta es la razón por la que al conformar una material multicapa, se encuentra en la parte media del envase, en contacto con el producto y no con el medio de almacenamiento y/o exhibición (Quiroga, G., 1995).

A continuación en la tabla 4 se muestran los valores de permeabilidad tanto del polietileno de baja densidad como del nylon 6-6:

Tabla 4. Valores de permeabilidad del polietileno de baja densidad y el nylon 6-6

POLIMERO	PERMEABILIDAD (ml/m ² /MPa/día) @ 30 °C			
	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O @ 90 % HR
LDPE	120	360	2.3	5.3
POLIAMIDA (nylon 6-6)	0.67	2.5	10	47

FUENTE: Lawry, R., 1998.

1.4.3 Propiedades mecánicas en películas flexibles de envasado

En general las películas flexibles presentan una amplia gama de propiedades que pueden ser empleadas para el diseño de envases, dichas propiedades de interés se refieren a la tensión, compresión, elasticidad, resistencia al impacto y fluidez principalmente, que en conjunto determinan la resistencia del material ante éstos esfuerzos mecánicos que tienen lugar durante su fabricación y su uso.

El estudio de las propiedades mecánicas se refiere a la respuesta de un cuerpo cuando se le somete a una fuerza externa, la cual genera una relación entre la tensión y la deformación que sufre dicho cuerpo (Brown, W., y Harrington, P. ,1992).

La resistencia de los materiales es una propiedad importante que es considerada un parámetro sujeto a condiciones de temperatura y tiempo; la resistencia de materiales flexibles se puede evaluar en términos de las siguientes propiedades;

- **Tensión o tracción:** se define como la capacidad de extensión del material en función al tiempo o la fuerza requerida para tales fines.
- **Compresión:** es un término mecánico referido a la presión que se aplica sobre el material con el fin de determinar el peso o carga que este soporta por encima de sí mismo una vez que se ha provocado una contracción de volumen.
- **Elasticidad:** se refiere a la propiedad que presentan los materiales para recuperar parcial o totalmente su forma primitiva cuando deja de actuar sobre él una fuerza que le ha provocado una deformación.
- **Impacto:** representa la fuerza que opone el material ante una colisión proveniente de un segundo cuerpo.
- **Fluidez:** representa la facilidad del material para que sus partículas puedan deslizarse unas sobre otras.

El estudio de la resistencia de los materiales ante estas propiedades por medio de ensayos mecánicos, permite evaluar la estabilidad del material considerando el fin para el que será destinado.

1.4.3.1 Ensayos mecánicos de polímeros

Existen diferentes tipos de ensayos desarrollados para evaluar el comportamiento de sistemas poliméricos; sin embargo, La Sociedad Americana para la Evaluación de Materiales

(ASTM) es quien ha desarrollado las técnicas más confiables para el estudio de materiales, en específico el comité F-2 de la ASTM que es el encargado de desarrollar las especificaciones para la evaluación de materiales flexibles empleados para el envasado. Existen algunos principios para la evaluación de todo tipo de materiales:

- Las muestras tienen que ser ampliamente identificadas.
- Las muestras deben ser tomadas con el cuidado suficiente con el fin de que el método de evaluación sea reproducible.
- El éxito del ensayo depende de las condiciones bajo las cuales se realice la prueba.
- El método de ensayo y el equipo empleado tienen que ser descritos y deben ser especificadas las modificaciones, si es que las hay, que se hayan hecho al método de análisis original (Dickinson, E., 1995).

Los ensayos son clasificados de la siguiente forma:

- ❖ CIENTIFICOS: Miden una propiedad específica en unidades absolutas, los resultados son independientes de la geometría y el diseño del equipo de ensayo. Los resultados cuantitativos obtenidos de un ensayo científico pueden ser aplicados al diseño de ingeniería de procesos.
- ❖ DE INGENIERIA: Estos ensayos además de medir propiedades específicas en una muestra y permitir el diseño de un equipo, su principio se basa en el tamaño y geometría de la muestra como factores de importancia.

Las variables que influyen en los ensayos de ingeniería de materiales son las siguientes:

- Tiempo
- Temperatura
- Humedad relativa
- Composición del material

- Morfología del material
- Geometría del material

Generalmente para la realización de ensayos mecánicos de materiales de envasado tales como las películas flexibles, se emplea como instrumento de medición la MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS INSTRON, la cual está diseñada para la evaluación de propiedades mecánicas tanto de flexión, tensión, dureza y compresión a través de ensayos de ingeniería en función de fuerza o energía requeridas así como el tamaño y geometría de la muestra, y su funcionamiento está adaptado a los requerimientos de la ASTM (www.instron.com).

El equipo de medición cuenta con muelles o mordazas que permiten sujetar las extremidades de las muestras, a pesar de que de esta forma se genera una acumulación de esfuerzos en la zona de sujeción, éste método es el más empleado para ensayar muestras planas y provocar una destrucción progresiva en el material sometido a evaluación, sin contener algún producto. La máquina universal Instron se basa en un proceso dinámico (relación fuerza-energía) condicionado a ciertos niveles de velocidad y de carga (expresada en fuerza) y de esta forma se determinan las resistencias del material. A continuación en la figura 2 se muestra una máquina universal INSTRON, la cual reporta el banco de datos a un software:



Figura 2. Imagen de una Máquina Universal Instron.

La resistencia a la tensión es el principal ensayo en materiales plásticos y se basa en el estudio de la elasticidad, para determinar el estado de tensión y/o deformación en el interior del plástico mientras su superficie es deformada por la acción de una fuerza.

Generalmente este estudio se evalúa por medio de un gráfico que expresa el alargamiento del material al ser ensayado en una máquina universal INSTRON, el cual se presenta en la figura 3:

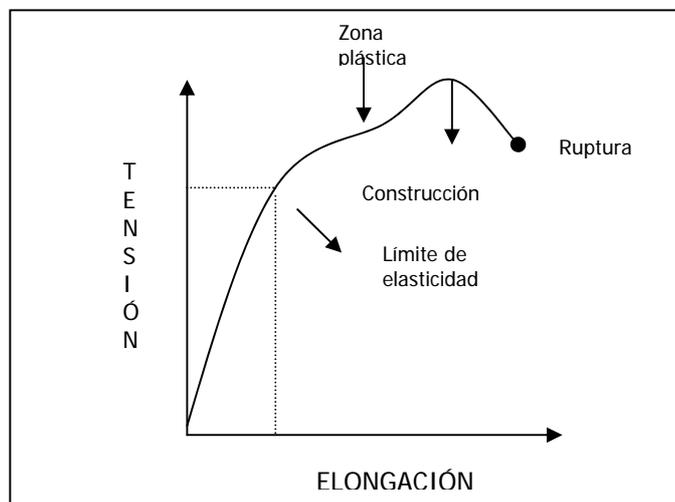


Figura 3. Curva típica de comportamiento elástico de polímeros (Robertson, G., 1993).

Regularmente el comportamiento de los plásticos obedece a la región lineal que se observa en la figura 3, con algunas excepciones, algunos suelen llegar a la ruptura.

Los plásticos de alta extensibilidad como las poliolefinas por ejemplo, son los más aptos para el envasado debido a que demandan y soportan suficiente energía por encima del punto de esfuerzo sin llegar a la fase de ruptura. Ciertamente en la vida cotidiana es necesario recurrir a la ruptura del material de envase para obtener su contenido, por ello, la necesidad de medir la fuerza necesaria para alcanzar éste punto, ya que ésta no debe superar la fuerza de un consumidor al manejar el material de envasado (Brown, W., y Harrington, P. ,1992).

Para lograr la interpretación de una curva de comportamiento mecánico, puede partirse de la determinación de parámetros mecánicos que se reflejan en una curva de este tipo y que facilitan la evaluación del material en distintas fases de comportamiento. A continuación se describen algunos de estos.

1.4.3.2 Módulo de Young

Evalúa la extensión del material, pero sólo se aplica a la región lineal de la curva mostrada en la figura 3 mientras una muestra es sometida a una carga. La región lineal representa que el material experimenta un proceso reversible que le permite regresar a su estado o condición original si la carga es modificada. En el punto en el cual la curva se aleja del comportamiento lineal de elongación, la ley de Hooke deja de ser aplicable, y entonces se genera una deformación permanente en la muestra; este punto es comúnmente llamado límite elástico o proporcional; en la curva obtenida del ensayo de tensión, a partir de éste punto comienza un estado de plasticidad en el material, es decir, ya no es sometido más a la tensión aún si la condición de carga fuese modificada (Dickinson, E., 1995).

1.4.3.3 Arrastre y fuerza de relajación

El arrastre y fuerza de relajación son fenómenos mecánicos relacionados con los cambios de estructura por encima de largos periodos de tiempo. El primero se refiere a la deformación en función del tiempo de un material o estructura sometido a una fuerza constante, es decir, a la deformación que ocurre después de una deformación elástica instantánea.

La fuerza de relajación representa una disminución en términos de fuerza aplicada a un material o estructura, el cual es sometido a una carga constante de estiramiento, es por ello que puede ser definida como la fuerza requerida luego del estiramiento, para alcanzar un nivel intencionado previamente, con el fin de garantizar que el material se deformó pero de manera reversible.

La mayoría de los plásticos se someten a ambas pruebas, ya que tanto el arrastre y la relajación generan cambios en forma y estructura en función a una condición de carga constante preestablecida (Brown, W., y Harrington, P., 1992).

1.5 Propiedades térmicas

Dentro de las propiedades de interés en polímeros para determinar las limitaciones del envasado, se encuentran las propiedades térmicas del material, las cuales son evaluadas por medio del análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido, básicamente para determinar temperaturas de transición y temperaturas de cristalización y fusión del material en cuestión (Jenkins, W., 1991).

1.5.1 Transiciones físicas en sistemas poliméricos

Los cambios de estado que experimenta cualquier material bajo condiciones específicas de temperatura y presión, reciben el nombre de transiciones físicas, en el caso de los polímeros, estos cambios de estado no están bien definidos aún. El estudio de las transiciones en materiales poliméricos es muy complejo, sobre todo porque en la actualidad existen más de 7 millones de copolímeros, lo que representa mayor dificultad para el estudio de la naturaleza de dicho material (Robertson, G., 1993).

Dentro de las transiciones más importantes a estudiar en materiales poliméricos, se encuentran las transiciones de primer orden, las cuales obedecen a cambios de fase en la estructura del material, tales como fusión y cristalización, mientras que las de segundo orden representan una transición vítrea.

La transición vítrea no representa el punto de fusión del material, representa una transición que se manifiesta en los polímeros *amorfos*; es decir, polímeros cuyas cadenas no están dispuestas según un ordenamiento cristalino, sino que están esparcidas en cualquier ordenamiento, aún en estado sólido, y está dada a la temperatura a la cual el material alcanza un cambio estructural. Los polímeros con baja temperatura de transición vítrea, usualmente son materiales duros y flexibles a bajas temperaturas, mientras que aquellos con altas temperaturas de transición vítreas, corresponden a aquellos que generalmente son quebradizos a temperaturas de refrigeración, es por ello que son mucho más aptos para soportar altas temperaturas.

Esta propiedad puede ser significativamente alterada por el uso de agentes plastificantes o por copolimerización, ya que esto permite extender la funcionalidad del polímero a diferentes intervalos de temperatura (Robertson, G., 1993).

El punto de fusión cristalino es la temperatura a la cual el polímero se solidificará en una forma cristalina cuando una vez fusionado se someta a enfriamiento. Muchos polímeros no exhiben ésta característica, por lo que son llamados "polímeros amorfos".

La velocidad de cristalización es sumamente importante durante el proceso de fabricación del material, y el que el polímero sea altamente cristalino, representa que es útil para su uso a elevadas temperaturas. La velocidad de enfriamiento de un polímero cristalino, además determina el desarrollo de estructuras amorfas, de hecho, bajo condiciones de enfriamiento rápido se minimiza el efecto amorfo de estructuras esféricas.

1.5.2 Ensayos térmicos

La calorimetría diferencial de barrido es la principal herramienta empleada en el análisis térmico de materiales, permite la obtención de una curva de flujo de calor en función al tiempo o temperatura, la cual puede ser analizada por medio de métodos matemáticos predeterminados al ensayo. En la figura 4 se muestra el montaje de un ensayo ordinario por calorimetría diferencial de barrido (DSC) donde se muestra el dispositivo en el cual el polímero o cualquier material de estudio son sometidos a calentamiento y/o enfriamiento:

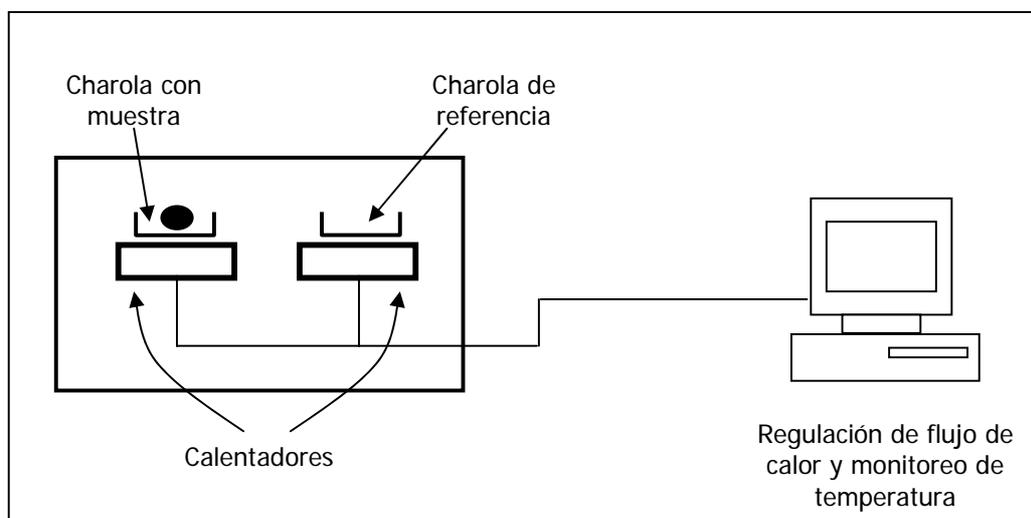


Figura 4. Representación de un ensayo por DSC (Heminger, W., 1998).

El dispositivo cuenta con dos platillos, en uno de ellos, se coloca la muestra polimérica. El otro platillo permanece vacío como referencia. Cada platillo se apoya sobre la parte superior de un calefactor. Luego se pone en funcionamiento el sistema de calentamiento o enfriamiento según sea el caso, mientras que el software se encarga de realizar el proceso a condiciones de velocidad constante (generalmente a $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) y a intervalos específicos, asegurándose que ambos platillos se calienten o enfríen a la misma velocidad. Respecto de ensayos realizados en muestras poliméricas, tanto térmicos, químicos y mecánicos de los polímeros más empleados para el envasado de alimentos, ya existen reportadas algunas propiedades, las cuales se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Propiedades generales de los materiales plásticos más empleados.

MATERIAL POLIMÉRICO	PROPIEDADES GENERALES				
	Propiedades mecánicas	Resistencia química	Propiedades ópticas	T de fusión (°C)	T de transición vítreo (°C)
Poliétileno de baja densidad	Duro, extensible y flexible	Inerte	Transparente	98	- 25
Poliétileno de alta densidad	Duro y flexible	Inerte	Transparente	137	- 125
Polipropileno	Tenso y fuerte	Inerte	Muy transparente	176	- 18
Cloruro de polivinilidino	Flexible y extensible	Inerte	Muy transparente	198	- 35
Poliestireno	Tenso y fuerte	Inerte	Muy transparente	240	100
Politetrafluoro- tileno	Fuerte y flexible	Inerte	Muy transparente	327	126
Cloruro de polivinilo	Suave y extensible	Inerte	Muy transparente	212	87
Poliétileno tereftalato	Fuerte	Inerte	Muy transparente	267	69
Policarbonato	Fuerte y muy duro	Inerte	Muy transparente	220	150

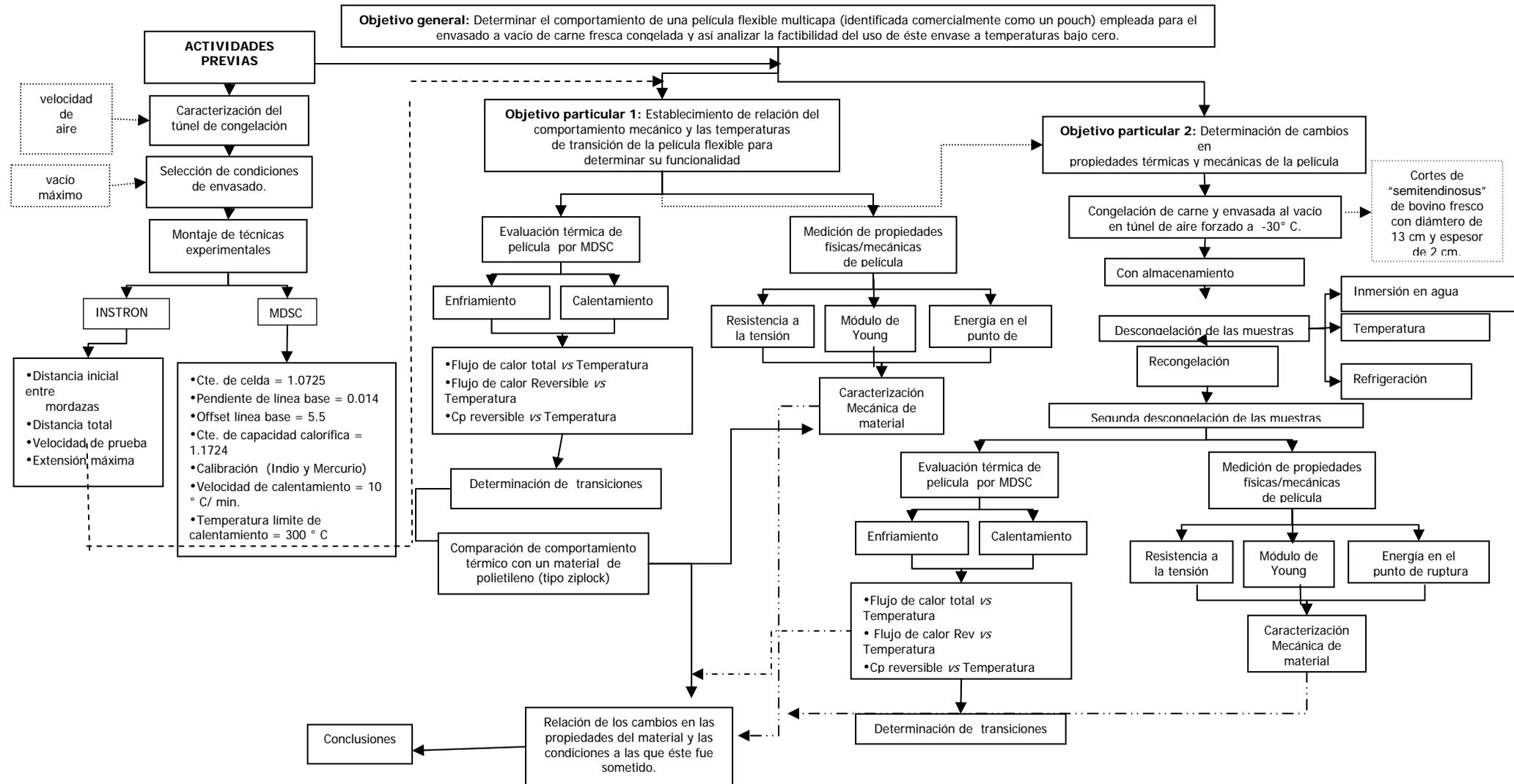
FUENTE: Brown, W., & Harrington, P., 1992.

Los datos reportados en la tabla 5 ofrecen una visión muy generalizada sobre las propiedades de algunos polímeros, en cuanto a las propiedades mecánicas se observa que prácticamente todos son fuertes y/o extensibles, mientras que el intervalo para las temperaturas de fusión es muy amplio y va de 98 °C a 220 °C, sin embargo, las propiedades específicas de un polímero, tanto mecánicas como térmicas se determinan en función al tipo de estructura ya mencionado (monocapa o multicapa) así como del método de fabricación del que provienen, dichos factores determinan tanto las ventajas como las limitaciones del material de envasado (Deanin, R., 1972).

II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

De acuerdo a la información expuesta en los antecedentes de este proyecto en torno a la importancia de la conservación y el envasado de alimentos, así como la funcionalidad de las películas flexibles que actualmente se emplean para el envasado de productos cárnicos, a continuación se presenta la metodología experimental que permitió determinar el comportamiento térmico y mecánico de una película flexible a base de polietileno de baja densidad y nylon 6-6 (película de referencia) empleada para el envasado a vacío de carne de res fresca y congelada.

2.1 CUADRO METODOLÓGICO



2.2 Descripción del cuadro metodológico

Objetivo general: Determinar el comportamiento de una película flexible multicapa (nylon 6-6 + polietileno de baja densidad) tipo pouch empleada para el envasado a vacío de carne fresca congelada y a su vez descongelada por diferentes métodos, para analizar la factibilidad de uso bajo condiciones congelación-descongelación.

Objetivo particular 1: Analizar la relación entre el comportamiento mecánico por máquina universal INSTRON y las temperaturas de transición por MDSC (Calorimetría diferencial de barrido modulada), de la película flexible multicapa al ser sometida a temperaturas de calentamiento y enfriamiento para determinar su funcionalidad como envase para el proceso de congelación, comparando con la evaluación de un material de polietileno de baja densidad.

Objetivo particular 2: Determinar los cambios en las propiedades mecánicas y térmicas de la película flexible multicapa después de la congelación-descongelación para analizar el efecto de estas condiciones sobre las propiedades de la misma.

2.2.1 Actividades preliminares

1. Caracterización del túnel de congelación por aire forzado: Consiste en determinar las características generales del equipo en el cual serán congeladas las muestras (dimensiones de la sección de congelamiento, medición de la velocidad del aire, límites de temperatura...etc.).
2. Montaje de técnicas: Establecer las condiciones de ensayo para el análisis del polímero tanto por máquina universal INSTRON así como por MDSC.

3. En el caso de los ensayos mecánicos fue necesario establecer las condiciones específicas para efectuar los ensayos en la máquina universal INSTRON en función de las siguientes variables:
 - Velocidad (mm/min)
 - Extensión máxima (mm)

4. Para la realización de ensayos por MDSC, con el fin de reproducir el experimento bajo los límites específicos que permitan obtener los resultados más representativos para la interpretación del comportamiento térmico, es necesario establecer dos métodos de ensayo en función a velocidad de calentamiento y/o enfriamiento y límites de temperatura, considerando como parámetros principales:
 - Velocidad de calentamiento/enfriamiento
 - Constante de capacidad calorífica
 - Constante de celda
 - Calibración de Línea base
 - Calibración de Temperatura

5. Selección de condiciones de envasado: esta actividad consiste en determinar las condiciones de operación durante la etapa de envasado (dimensiones de la película de envasado, vacío máximo).

2.2.2 Actividades generales

- La película flexible multicapa (sin contenido), fue evaluada en ensayos mecánicos de tensión (por triplicado) que permitieron conocer la capacidad de resistencia por parte del material antes de ser expuesto a temperaturas de congelación. Los parámetros obtenidos para la evaluación de comportamiento mecánico fueron los siguientes:
 - Tensión máxima
 - Módulo de Young
 - Energía en el punto de ruptura

La película flexible multicapa se sometió a ensayos térmicos de calentamiento/ enfriamiento, (por duplicado) con el fin de determinar las transiciones físicas más significativas en el material; a partir de los gráficos correspondientes al Flujo de calor total, el Flujo de calor no reversible y Capacidad calorífica reversible (C_p), con respecto a la Temperatura en que se identificaron las transiciones térmicas en el material y de ahí los siguientes parámetros:

- Capacidad calorífica
 - Entalpía de fusión
 - Temperatura de fusión
- Se realizó la evaluación mecánica y térmica (por triplicado y duplicado, respectivamente) de un material de polietileno de baja densidad con el fin de cotejar el comportamiento de la película flexible multicapa respecto a éste. A partir de ensayo de éste material de referencia se obtuvieron los mismos parámetros que en los casos anteriores.

Una vez que fueron evaluadas dichas muestras, se procedió a la congelación de la carne de res fresca, cuyas muestras fueron tomadas de "*semitendinosus*" (cuete) rebanado con diámetro = 11 cm y espesor = 2 cm, y masa aproximada de 200 g, se congelaron 6 cortes de cuete en el túnel por aire forzado para después ser envasadas a vacío.

El proceso de congelación por aire forzado se llevó a cabo a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el proceso de envasado se efectuó a una presión máxima de vacío de 999 mm Hg.

Las muestras congeladas permanecieron almacenadas en congelación a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un lapso de siete días para después ser descongeladas en tres modalidades:

- Descongelación a temperatura ambiente en circulación normal de aire
- Descongelación por inmersión en agua
- Descongelación a temperatura de refrigeración

Una vez descongeladas las muestras fueron almacenadas en congelación nuevamente por un lapso de 24 horas. Finalmente, después de éste proceso de recongelación, las muestras se descongelaron por segunda vez de la misma forma que en un principio.

Después del segundo proceso de descongelación, se procedió a la obtención de la película flexible de envasado. Estas muestras (a temperatura ambiente) fueron empleadas para la realización de ensayos tanto térmicos como mecánicos a las mismas condiciones a las que se llevaron a cabo previo al proceso congelación-ensado, de esta forma se hizo posible la evaluación de los cambios en las propiedades del material por efecto de la fluctuación de temperatura y la exposición del material a temperaturas inferiores a 0 °C.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados más relevantes de las actividades experimentales que llevaron a cubrir los objetivos planteados, partiendo de la realización de las actividades preliminares.

3.1 Actividades preliminares

Como se observa en el cuadro metodológico, estas actividades corresponden a la caracterización del túnel de congelación Low heat Quality heating equipment by Armfield, a la selección de las condiciones de envasado y al montaje de técnicas tanto para el INSTRON como para el MDSC.

3.1.1. Caracterización del túnel de congelación por aire forzado

Las características principales del túnel de congelación son las presentadas en la tabla 6, cuya imagen se presenta en la figura 5:

Tabla 6. Características del túnel de congelación por aire forzado

COMPONENTES DEL TUNEL	No. De ELEMENTOS	CARACTERÍSTICAS
Ventilador del evaporador	1	Potencia: 1kW
Compresor	1	Potencia: 4kW
Charolas	4	Dimensiones: 30x31.3 cm.



Figura 5. Túnel de congelación por aire forzado.

La temperatura mínima que alcanza el equipo se conoce como dato técnico de fabricación y es -35 °C, en base a ello, se determinó la velocidad del aire con un anemómetro de hilo

caliente a la condición de congelación establecida (-30 °C) para así determinar el valor promedio y el coeficiente de variación.

Respecto al perfil de velocidades a -30 °C este fue realizado de acuerdo a la siguiente disposición de las charolas dentro del túnel el cual se muestra en la figura 6:

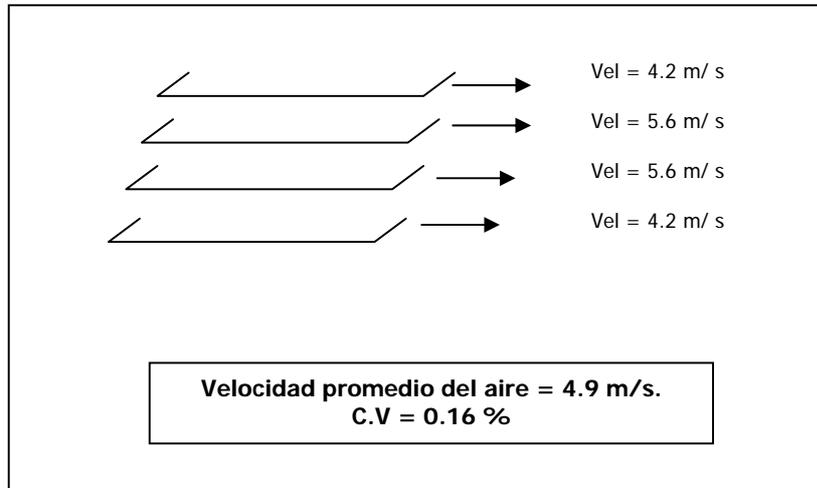


Figura 6. Disposición de charolas para la medición del perfil de velocidades

Una vez caracterizado el túnel de congelación se procedió a la selección de condiciones de envasado en la cámara de vacío.

3.2 Montaje de técnicas

Con el fin de establecer las condiciones experimentales a las cuales se desarrollaran las mediciones tanto de propiedades térmicas como mecánicas, a continuación se describen los montajes de los ensayos para la medición de dichos parámetros.

3.2.1 Montaje del ensayo mecánico de la muestra para la determinación de la tensión máxima

De acuerdo al método D-882-80 A de la ASTM la obtención de muestras se llevo a cabo por medio del uso de una probeta (suaje) con dimensiones específicas empleado como un estándar para la evaluación de polímeros en cuanto a ensayos de tracción se refiere (Bonner,

M., Saunders, L. y Ward, M., 2002). A continuación en la figura 7 se muestra la forma y dimensiones de la probeta:

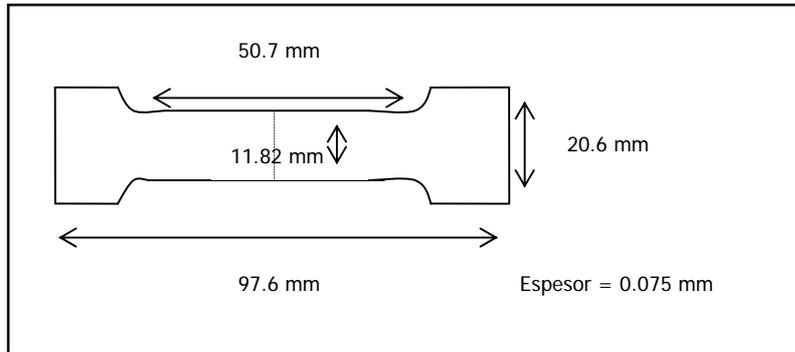


Figura 7. Probeta empleada para ensayos mecánicos de tracción.

La disposición para la toma de muestras fue la siguiente de acuerdo a lo que se ejemplifica en la figura 8:

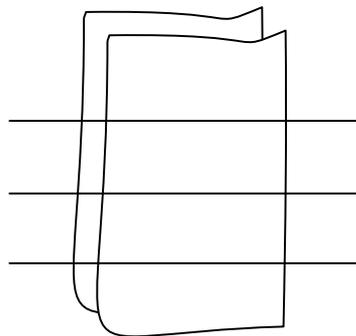


Figura 8. Disposición para el corte de muestras.

Las condiciones iniciales del ensayo fueron las siguientes:

- Distancia inicial entre mordazas = 51.09 mm
- Distancia total = 51.94 mm
- Celda de carga = 5 KN

En lo que se refiere a las condiciones de velocidad de la cruceta y la extensión máxima, se realizaron condiciones de prueba en los niveles mostrados en la tabla 7:

Tabla 7. Niveles de variación para el montaje del ensayo mecánico de tensión.

NIVELES	Velocidad (mm/min)	Extensión máxima (mm)
1	25	120
2	50	170
3	70	220

De acuerdo a las actividades planteadas en el cuadro metodológico, con el fin de obtener los parámetros mecánicos más representativos respecto al comportamiento de la película flexible multicapa, fueron elegidos los niveles de variación para conseguir dichos fines, se concluyó que el montaje final del ensayo se llevaría a cabo bajo las condiciones establecidas en el nivel 3, ya que bajo estos límites, es posible obtener un panorama amplio sobre la resistencia mecánica ante los esfuerzos a los que el material es sometido; lo que permitió obtener los valores de tensión máxima, módulo de Young y energía en el punto de ruptura de las muestras estudiadas.

Una vez que fueron montadas las técnicas de ensayo correspondientes, fueron realizadas las actividades planteadas para la resolución del objetivo particular No. 1, referidas a la evaluación térmica y mecánica del material de envasado por sí sólo.

3.2.2 Montaje del ensayo térmico por MDSC

Para el montaje de los ensayos por calorimetría diferencial de barrido fueron creados métodos de ensayo bajo las siguientes condiciones de prueba:

- Masa de la muestra = 3.5 mg
- Constante de celda = 1.0725
- Pendiente de línea base = 0.014
- Offset línea base = 5.5
- Constante de capacidad calorífica = 1.1724
- Calibración de temperatura (Indio y Mercurio como estándares)
- Velocidad de calentamiento = 10 °C/ min
- Modulación de 1.596 °C / 60 s
- T° fusión del Indio= 156.6 ° C

- T° fusión del Mercurio = -38.8 ° C

La temperatura límite de calentamiento o enfriamiento se modificó dependiendo del tipo de ensayo. Las muestras fueron colocadas dentro de charolas de aluminio hermético y con ambiente de nitrógeno. Se consideró el peso de muestras entre 2.2 a 3.5 mg para asegurar un control adecuado en cada corrida.

En función a los objetivos planteados se crearon dos métodos de ensayo:

- i. Calentamiento de -60 °C a 300 °C a una velocidad de calentamiento igual a 10 °C/min equilibrada a 0°C con una isoterma de 3 minutos
- ii. Calentamiento de -40 °C a 300 °C a una velocidad de calentamiento igual a 10 °C/min equilibrada a -40 °C con una isoterma de 10 minutos

3.2.3 Selección de condiciones de envasado

Con base al manual de operación del equipo, se determinaron los valores de vacío máximo y mínimo; la sensibilidad, el tiempo de sellado trabajado por el equipo y se programó en función al tipo de bolsas. Dicho programa fue asignado para el envasado a vacío de carne congelada.

Se trabajaron bolsas adquiridas por el proveedor oficial del equipo de envasado con dimensiones de: 18 x 25 cm.

3.3 Ensayos mecánicos

De acuerdo al planteamiento del cuadro metodológico y el montaje de técnica para la determinación de comportamiento mecánico, se efectuaron ensayos correspondientes con base a las condiciones establecidas en las actividades preliminares; para la evaluación del material flexible de referencia comparado a su vez con muestras de polietileno de baja densidad, esto con el fin de corroborar el comportamiento de las capas de polietileno que conforman la película flexible multicapa.

3.3.1 Ensayos mecánicos en muestras de película flexible multicapa y polietileno de baja densidad

Al exponer a esfuerzos mecánicos ambas muestras aún sin ser empleadas para un proceso de envasado y almacenamiento, se encontró más de un parámetro de interés al caracterizarlas, la tendencia de comportamiento mecánico, se asemeja en gran medida debido a la presencia de polietileno en la estructura de éstos; las condiciones del ensayo fueron las mismas para cada caso, a continuación en la figura 9 se presenta un gráfico representativo de ésta caracterización:

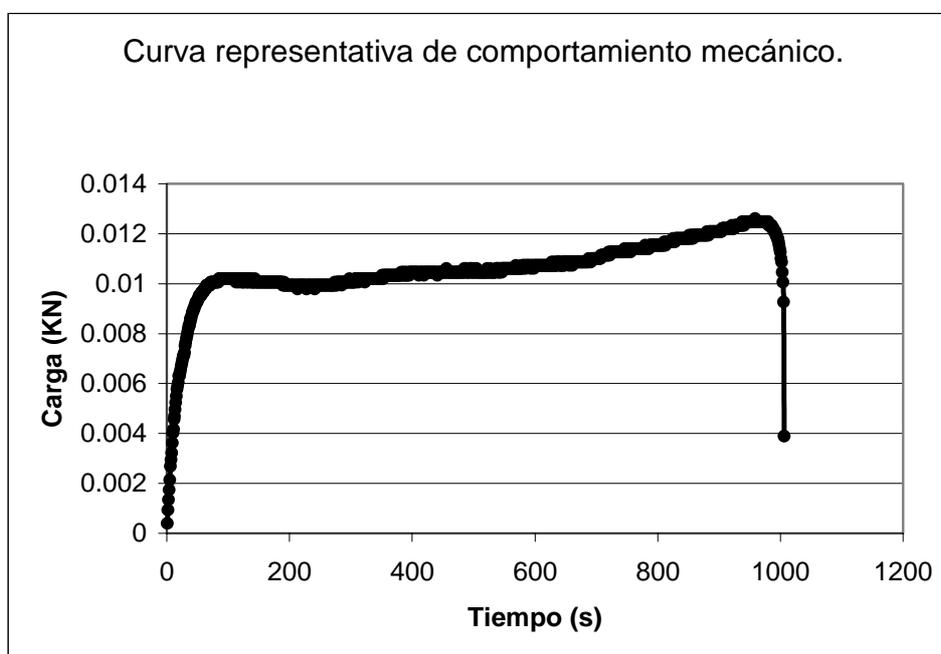


Figura 9. Comparativo de caracterización mecánica entre película flexible multicapa y polietileno de baja densidad

La figura 9 representa el comportamiento mecánico de un ensayo de tensión (tracción) donde se refleja el agotamiento del material hasta la ruptura, de manera general se observan las zonas más importantes para su análisis, es decir, la zona lineal, la zona de fluencia, la zona plástica y por último el punto de ruptura, tal cual se describió en el marco teórico, por lo que a partir de los ensayos realizados es posible discutir sobre la resistencia mecánica de los materiales analizados.

Ambos materiales se ensayaron en función al tiempo, hasta alcanzar la ruptura, por lo cual, se procede a la discusión de los siguientes valores, los cuales se presentan en la tabla 8:

Tabla 8. Valores promedio obtenidos del ensayo mecánico para la película flexible multicapa y el polietileno de baja densidad.

MATERIAL DE ENVASADO	Tensión en la carga máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Energía en el punto de ruptura (J)
Película flexible multicapa	23.34	79.95	2.32
Polietileno de baja densidad	13.05	43.75	0.94

La tensión en la carga máxima, expresada como una resistencia por parte del material, tiene un valor mayor en la película flexible multicapa respecto al polietileno de baja densidad, al comparar éste último con ensayos ya realizados en polietileno, se encontró que el valor promedio para ésta propiedad es de 14.68 Mpa (Gascue, B.,2003)., mientras que para materiales multicapa éste valor es de 28 MPa (Robertson, G., 1993); resulta congruente que al contrastar esfuerzos para uno y otro material, el envase de referencia integrado por polietileno + poliamida (nylon 6-6) presente mayor resistencia ante el esfuerzo mecánico ya que de hecho las funciones de ésta última se concentran en proveer alta resistencia a la tracción y a las altas temperaturas. Desde el punto de vista de consumo de energía y fuerza para lograr daño estructural en el material debido al esfuerzo al que fueron sometidos, es evidente que el material de referencia, en suma, requiere de la aplicación de mayor fuerza para lograr un efecto de elongación irreversible, fenómeno que puede ser discutido a partir del valor del modulo de Young, donde el material deja de obedecer a la ley de Hooke, es decir, en función a la carga, el material experimenta una deformación que depende del grado de elongación que éste alcanza, una vez que se elonga para no regresar nuevamente a su estado original, ya hablamos de un proceso irreversible; a partir de la tabla 8 se determina que el material de referencia tiene mayor capacidad de elongación antes de alcanzar éste punto, y por consiguiente también requiere de mayor fuerza (J) para ser fatigado hasta la ruptura, la muestra de polietileno de baja densidad requiere solamente del 40% de la fuerza que consume el primero; más adelante se discutirán los cambios en las propiedades antes evaluadas una vez que el material haya sido empleado.

3.4 Análisis térmico

3.4.1 Análisis térmico de -60 °C a 300 °C

Con el fin de analizar térmicamente las transiciones de la película flexible multicapa en un intervalo de temperaturas que comprenda el calentamiento de la muestra desde temperaturas inferiores a 0 °C, se llevó a cabo un ensayo térmico por duplicado calentando la muestra de 3.3 mg desde -60 °C hasta 300 °C a una velocidad de 10 °C / min (Método I), cuyo gráfico se observa en la figura 10:

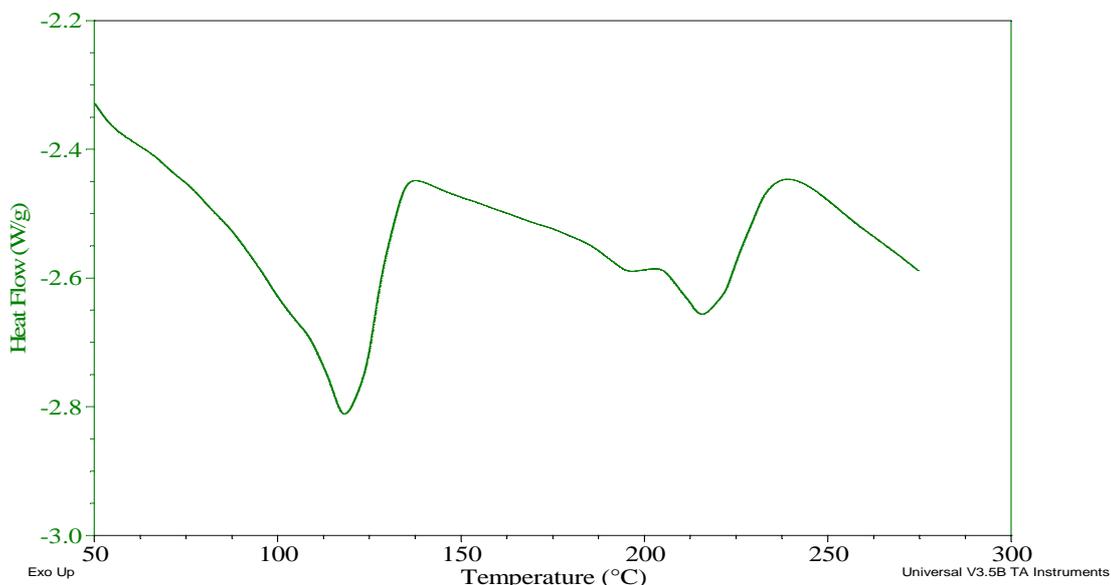


Figura 10. Análisis térmico de película flexible multicapa calentamiento de -60 °C a 300 °C

A partir del análisis térmico de la película flexible multicapa, se observan dos transiciones importantes en la curva de flujo de calor total, la primera de éstas se dio a 117.82 °C con un requerimiento energético de 72.97 J/g, la cual obedece a una transición de primer orden reflejado en un cambio de fase y que corresponde al punto de fusión del polietileno presente en la muestra como componente mayoritario, de hecho la mayoría de los materiales termoplásticos presentan una temperatura de fusión (T_m) por debajo de 150 °C, con excepción del polipropileno en estado puro, para el cual el punto de fusión está dado a una

temperatura de 153 °C con un requerimiento energético o entalpía de fusión de 77.7 J/g (Robertson, G., 1993). La segunda transición en la muestra se presentó a 221.04 °C y también corresponde a una transición de primer orden, pero para este caso, representa el punto de fusión de la poliamida (nylon 6-6) presente en la muestra con un requerimiento energético menor comparado con la primera transición, el cual fue de 10.72 J/g, ya que este material termoplástico se encuentra minoritariamente en la muestra, lo cual explica que el requerimiento energético en la etapa transitoria sea menor, ya que la entalpía es una propiedad extensiva, dicho valor es muy similar al que reportan Wulin, Q., Habenschuss, A. y Wonderlich, B., 2007.

A continuación en la figura 11 se muestra la curva de flujo de calor total en función a la temperatura, donde se observan los requerimientos energéticos para ambas transiciones térmicas durante el calentamiento del material de referencia.

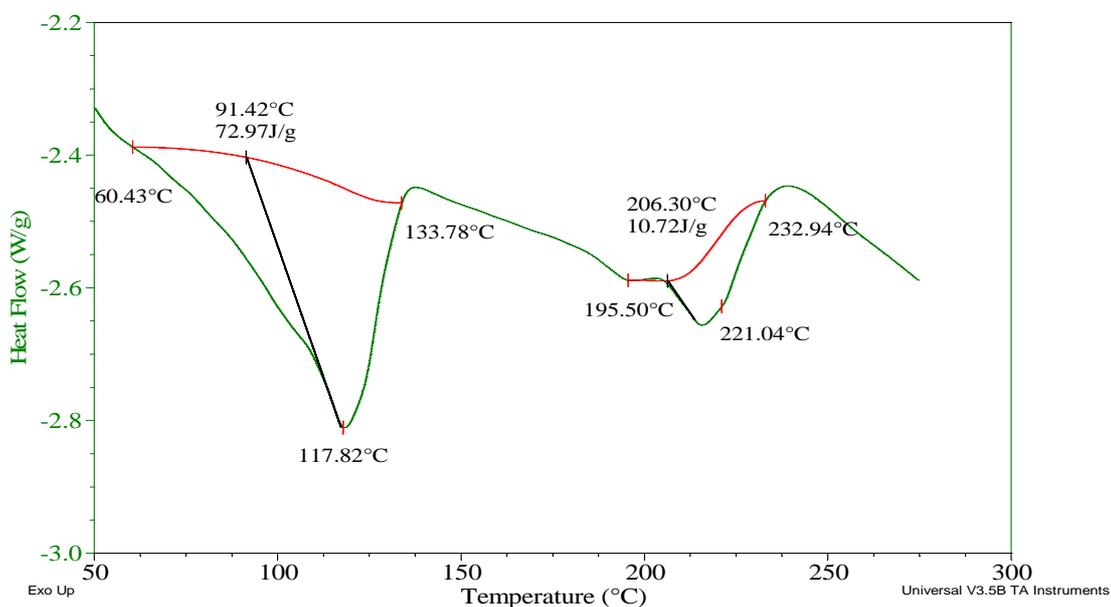


Figura 11. Requerimientos energéticos durante el calentamiento de la película flexible multicapa de -60 °C a 300 °C.

Además de discutir numéricamente los requerimientos energéticos en cada transición, cabe mencionar que basta con observar la amplitud de las curvas para inferir qué punto de fusión

demanda mayor energía para lograr el cambio de fase, la transición más pequeña corresponde al componente que se encuentra en menor proporción, es decir, la poliamida.

3.4.2 Análisis térmico de polietileno de baja densidad

Debido a que el material de estudio esta conformado en su mayoría por polietileno de mediana densidad, se consideró necesaria la caracterización térmica de un material polimérico identificado como polietileno de baja densidad, con el fin de hacer una comparación entre los puntos de fusión determinados en uno y otro material, ya que en varias investigaciones se han caracterizado materiales de éste tipo para determinar justamente este parámetro, por lo que ya existen valores de referencia; se conoce que el polietileno fusiona entre 110 °C y 135 °C en función a su densidad (Gáscue, B. y Figueroa, A., 2003). La comparación entre el comportamiento térmico de éstos dos materiales se muestra en la figura 12:

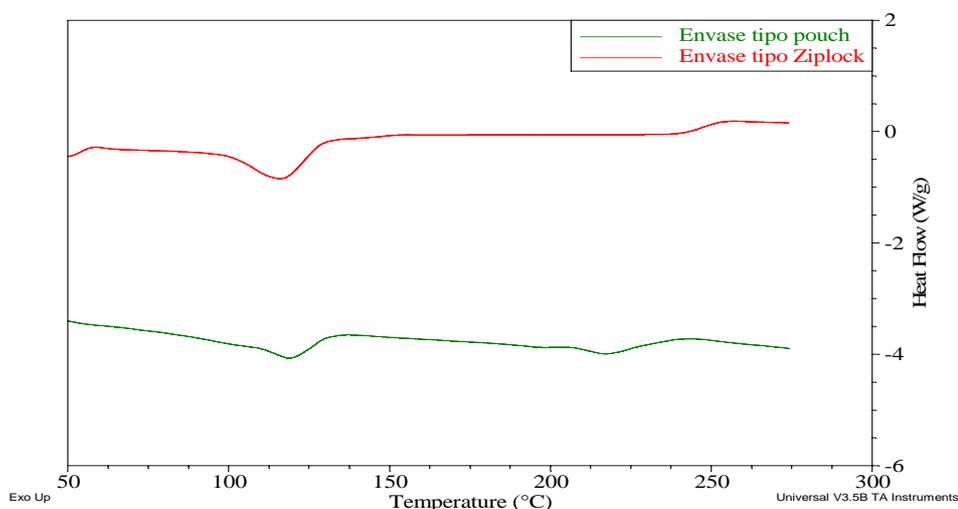


Figura 12. Comparativo del análisis térmico con polietileno de baja densidad (tipo ziplock) calentamiento de -60 °C a 300 °C

En la figura 12 puede verificarse que el comportamiento térmico que presenta el polietileno de baja densidad es muy similar al que presenta el material de referencia (multicapa), de hecho, los puntos de fusión no se ven modificados de manera considerable. El cambio de

fase se detectó a 116.68 °C, y cabe aclarar que no tiene lugar una segunda transición, ya que no se trata de un material en el que haya sido incorporada alguna capa de poliamida (nylon 6-6) por tanto, esta señal endotérmica no se presenta.

Respecto a los cambios en la capacidad calorífica, cabe mencionar que dicho parámetro se ve modificado de acuerdo a los puntos de fusión entre uno y otro material, en la figura 13 puede observarse la tendencia de Cp para cada muestra.

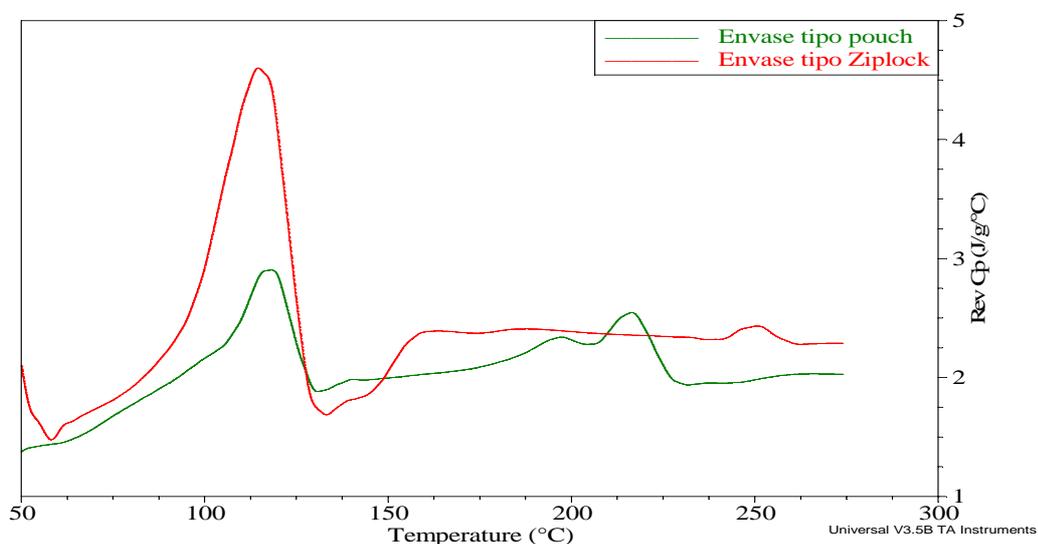


Figura 13. Comparación en capacidad calorífica, calentamiento de -60 °C a 300 °C

De la figura anterior se infiere que para la muestra de polietileno de baja densidad (tipo ziplock) el valor de Cp es mayor respecto al envase de referencia (tipo pouch), en un orden de 4.5 J/ g ° C comparado con 2.9 J/ g ° C en éste último, atribuido a que la temperatura de fusión es más alta en el polietileno de baja densidad, sin embargo, la tendencia de comportamiento es muy semejante en ambos casos, excepto que el Cp presenta menos discontinuidad en la muestra de polietileno por encima de 150 °C, ya que no existe otro polímero presente en el mismo, capaz de generar cambios estructurales adicionales.

3.4.3 Enfriamiento de la película flexible multicapa a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una isoterma de 10 minutos

Considerando que la película flexible será empleada para la conservación de carne congelada a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y almacenada a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, se optó por analizar el material durante un proceso de enfriamiento equilibrado a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ manteniendo esta temperatura constante por 10 minutos, y posteriormente calentada hasta $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto con el fin de simular el comportamiento de la película de envase al ser expuesta a estas condiciones de temperatura, las cuales corresponden a temperaturas de congelación, y finalmente al calentar y observar si la isoterma modifica en algún sentido los puntos de fusión del material. La tendencia del material bajo estas condiciones de ensayo se observan en la figura 14:

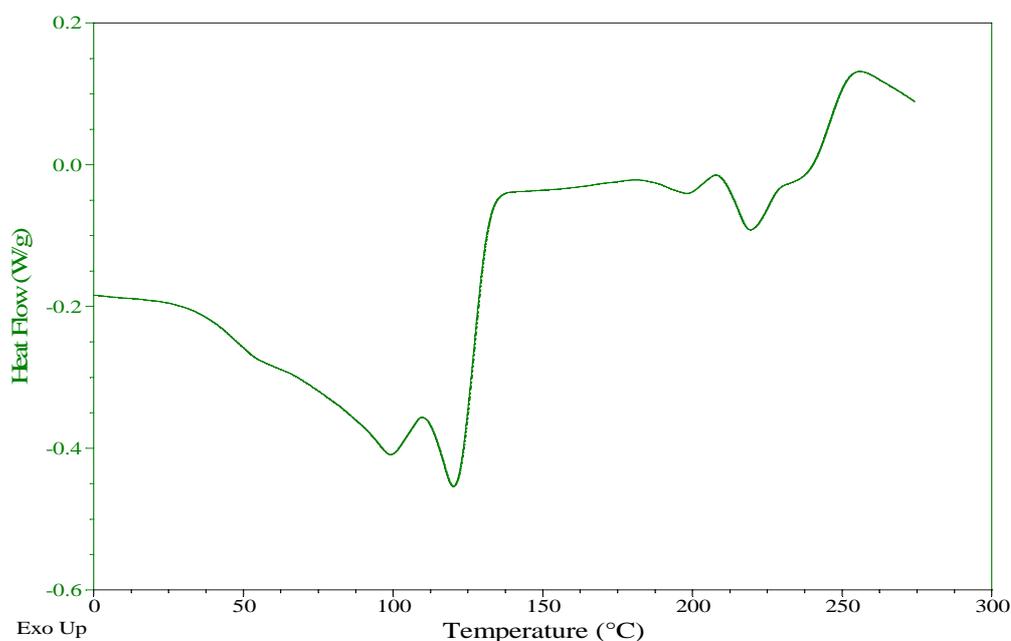


Figura 14. Enfriamiento de la película flexible multicapa a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una isoterma de 10 min

Pese a que la muestra fue equilibrada a una isoterma de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 10 minutos, el análisis térmico refleja que bajo ésta condición de ensayo, el material no experimenta cambios en las temperaturas de fusión, lo cual es consecuencia de que aún sometido a bajas temperaturas el material no se encuentra expuesto a una condición tal que pueda generar transiciones que posteriormente generen reordenamientos moleculares influyentes sobre los puntos de fusión,

de ésta forma, se determinó que los intervalos de éste ensayo no son capaces de modificar éste parámetro.

Concluidas las actividades planteadas para la resolución del primer objetivo particular, se procedió a la segunda etapa del proyecto; se congelaron en un túnel de congelación por aire forzado 15 muestras de carne de bovino proveniente de corte seleccionado para luego ser envasadas a vacío y almacenadas en una cámara de congelación a $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$. El pH inicial de las muestras fue de 6.9.

En la figura 15 se observan las muestras congeladas y envasadas:



Figura 15. Muestras congeladas y envasadas al vacío en la película flexible multicapa

En la figura 15 se aprecia el vacío que se logró con el proceso de envasado, la ausencia de oxígeno permite que el material flexible se adhiera en su totalidad a la carne.

Transcurrido un periodo de almacenamiento de siete días, las muestras se descongelaron por los tres distintos métodos de descongelación planteados, bajo las condiciones citadas en la tabla 9:

Tabla 9. Condiciones de descongelación para las muestras envasadas a vacío.

CONDICIONES	MÉTODO DE DESCONGELACIÓN		
	T° REFRIGERACIÓN	INMERSIÓN EN AGUA	T° AMBIENTE DEL AIRE
T° del medio	6.4 °C	19 °C	25 °C
%HR (Habitación de descongelación)	27 %	29%	29 %

El proceso de descongelación se llevó a cabo en dos etapas, puesto que se pretendió generar fluctuaciones de temperatura en las muestras, de tal forma que éstas fueron almacenadas en congelación luego de la primera descongelación y 24 hrs. después fueron descongeladas nuevamente a las mismas condiciones para finalmente obtener el material de envasado y así evaluar el material flexible, expuesto hasta ese momento a diferentes condiciones. A continuación se pueden apreciar las muestras una vez que fueron descongeladas por segunda ocasión:



Fig. 16 Muestra descongelada a T° de refrigeración



Fig. 17 Muestra descongelada por inmersión en H₂O



Fig. 18 Muestra descongelada a T° ambiente

En las figuras anteriores se observa la aparición de jugos exudados en las muestras una vez que fueron descongeladas por segunda ocasión, la muestra descongelada a temperatura de refrigeración presenta la mayor cantidad *“aparente”* de exudados, mientras que la muestra descongelada por inmersión en agua presentó menor liberación de éstos comparada con el resto de las muestras, debido a que por éste método la carne envasada y cualquier otro material, logra descongelarse en un periodo de tiempo más corto que por otros métodos.

3.5 Resultados de comportamiento mecánico de la película flexible multicapa empleada para envasado y congelación

De las películas flexibles provenientes de la descongelación, se tomaron muestras para la evaluación de comportamiento mecánico, con el propósito de cotejar los cambios que se dieron en la película plástica, y de esta forma analizar también la posible influencia del método de descongelación empleado, de la misma forma que se analizó desde el punto de vista térmico.

Al analizar los resultados que se obtienen de esta caracterización, las muestras descongeladas presentan cambios estructurales reflejados en cambios en la tensión del material, módulo de Young y energía en el punto de ruptura, todos estos analizados dentro de la zona lineal que correspondería a la curva de evaluación mecánica, es decir, hasta donde prevalece la ley de Hooke.

En la tabla 10 se presentan los valores ya mencionados y se comparan con el material de referencia:

Tabla 10. Valores promedio obtenidos del ensayo mecánico para las muestras congeladas y descongeladas.

MUESTRAS	Tensión en la carga máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Energía en el punto de ruptura (J)
Película flexible multicapa de referencia (Sin almacenamiento)	23.34	79.95	2.32
Película congelada y descongelada a T° de Refrigeración	14.56	64.45	1.30
Película congelada y descongelada a T° ambiente	13.67	62.59	1.0174
Película congelada y descongelada por inmersión en agua	17.86	65.08	1.75

A partir de la tabla 10, de forma global se aprecia el cambio de estructura ya señalado, puesto que respecto al valor de referencia, las tres muestras descongeladas en cada caso presentan un valor menor, de tal suerte que expresado a nivel fuerza para el valor de tensión y el módulo de Young, las muestras sometidas a la misma carga antes y después del almacenamiento y la descongelación, requieren de menos fuerza que en un inicio para alcanzar un estado de elongación reversible; del mismo modo, en términos de energía, los consumos se ven disminuidos para lograr la ruptura como un fenómeno irreversible. Expresado de otra forma, a continuación se observa gráficamente cómo disminuyen los requerimientos de fuerza aplicada respecto al material de referencia:

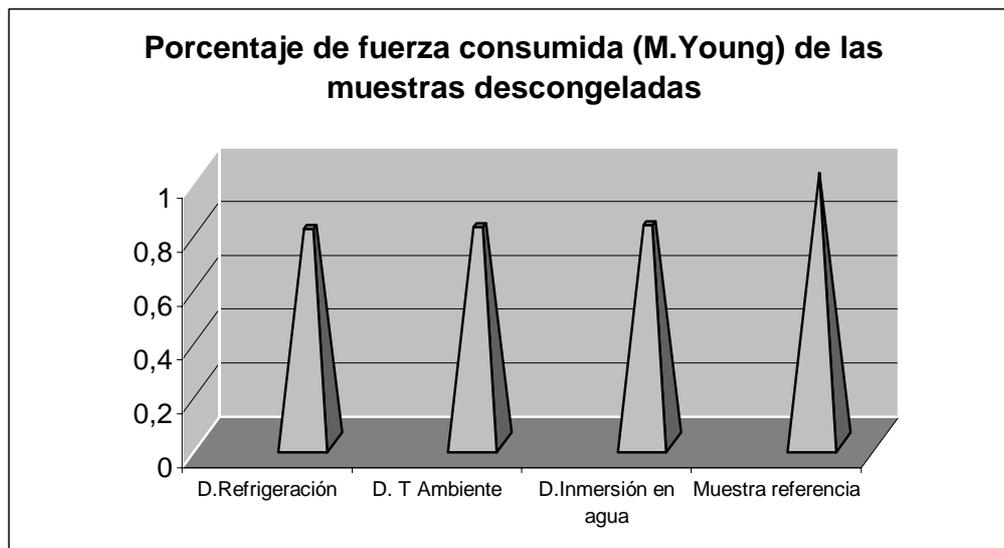


Figura 19. Porcentaje de fuerza consumida (Módulo de Young) de las muestras descongeladas

En la figura 19 se expresa que al considerar como 100 % la fuerza requerida por el material en un inicio (sin almacenamiento y descongelación), las muestras descongeladas únicamente consumieron un promedio del 80 % de la fuerza inicial en la región lineal durante el ensayo mecánico, a partir de lo cual se asume que el material se modifica estructuralmente, sin embargo, el consumo de energía, no es sumamente inferior al valor de referencia; y al mismo tiempo al analizarlo en función al método de descongelación, se observa que éste no influyó en los resultados de comportamiento mecánico, , los valores del módulo de Young para una y otra muestra se asemejan entre uno y otro método. Desde otro punto de vista, es interesante resaltar que los cambios experimentados por la carne durante el almacenamiento y la descongelación, particularmente la liberación de jugos es capaz de influir sobre las propiedades del material de envasado, ya que esto conduce a una absorción de líquidos por parte del material, de tal forma que la región amorfa de la película sufre un fenómeno de plastificación o rigidez, el cual modifica las propiedades mecánicas de éste (Chang, P., 2000).

La plastificación de los materiales flexibles explica la disminución del módulo de Young en las muestras descongeladas respecto a la referencia, ya que la rigidez sobre la cual se ha hablado, reduce la tensión máxima del material, debido a que la absorción de agua fragiliza

el material generando que a una menor aplicación de fuerza, éste alcance el estado irreversible, es decir, la ruptura o fatiga. (Hong, L., Karim, A. y Choon, C., 2006).

3.6 Resultados de evaluación térmica de la película flexible multicapa empleada para envasado y congelación

De las mismas películas flexibles multicapa de las que se tomaron las muestras para la realización de los ensayos mecánicos, se obtuvieron también muestras para ser evaluadas térmicamente por MDSC, bajo las condiciones de ensayo empleadas en la primera etapa de este trabajo. Se realizaron los ensayos térmicos del material con el método I correspondiente al calentamiento de las muestras en un intervalo de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuya masa se reporta a continuación:

- Muestra descongelada a T° ambiente = 3.4 mg
- Muestra descongelada a T° refrigeración = 3.2 mg
- Muestra descongelada por inmersión en agua = 3.1 mg

A continuación en la figura 20 se muestra un gráfico comparativo de flujo de calor total por MDSC para la evaluación de las diferentes muestras:

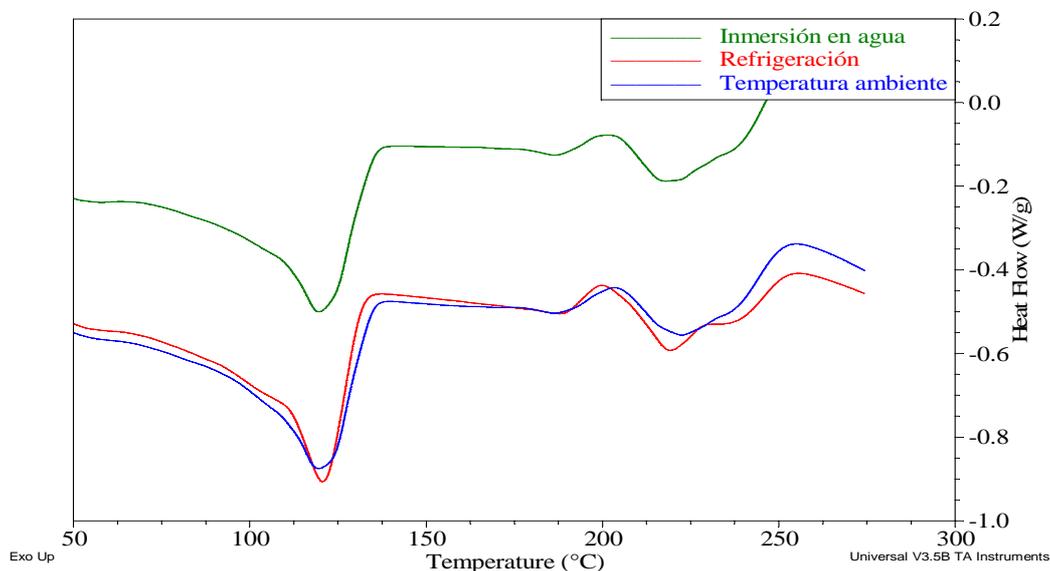


Figura 20. Comparativo del análisis térmico de las muestras descongeladas por diferentes métodos

En la figura 20 se observa un comportamiento térmico muy semejante entre una y otra muestra. La tendencia es la misma, pese a que la muestra descongelada por inmersión en agua, se desfasa del plano respecto a las dos muestras restantes; sin embargo, a partir del gráfico puede inferirse que para éste método de descongelación el comportamiento térmico del material no se modifica bajo las condiciones de calentamiento a las cuales fue sometido.

Para confirmar lo anterior, a continuación se presenta el gráfico comparativo de capacidad calorífica para cada una de las muestras:

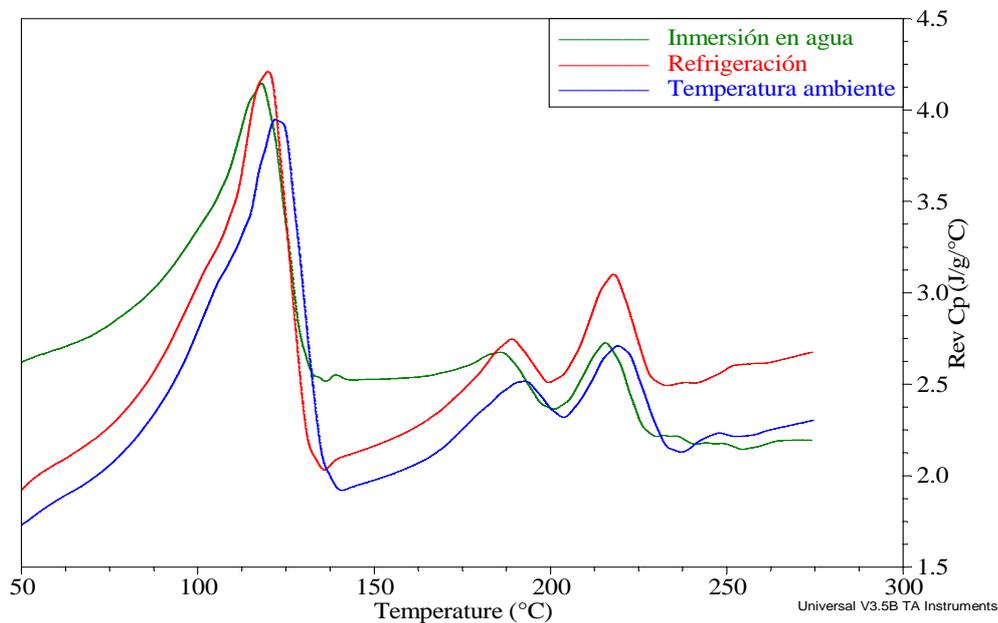


Figura 21. Comparativo de capacidad calorífica de las muestras descongeladas por diferentes métodos

Al comparar las curvas de Cp para cada muestra, se hace más visible la tendencia de éstas.

Los cambios más significativos ocurren en los siguientes intervalos de temperatura:

- 100 °C – 150 °C
- 200 °C – 250 °C

Dentro de dichos intervalos tienen lugar las principales señales endotérmicas en la curva de flujo de calor total, por ello, éstos cambios en capacidad calorífica son congruentes para las tres muestras evaluadas, pero bien, respecto a los valores que toma el Cp, también es posible decir, que no varían considerablemente, de hecho se aprecia directamente en el gráfico, el valor más alto que se da para las tres muestras ésta dado de 4 a 4.25 J/ g °C en la

temperatura máxima de fusión, comparado con la capacidad calorífica que presentó el material en la primera etapa experimental (antes del proceso de congelación-ensado) el valor no se modifica drásticamente, lo cual, puede ser apreciado en el siguiente gráfico comparativo:

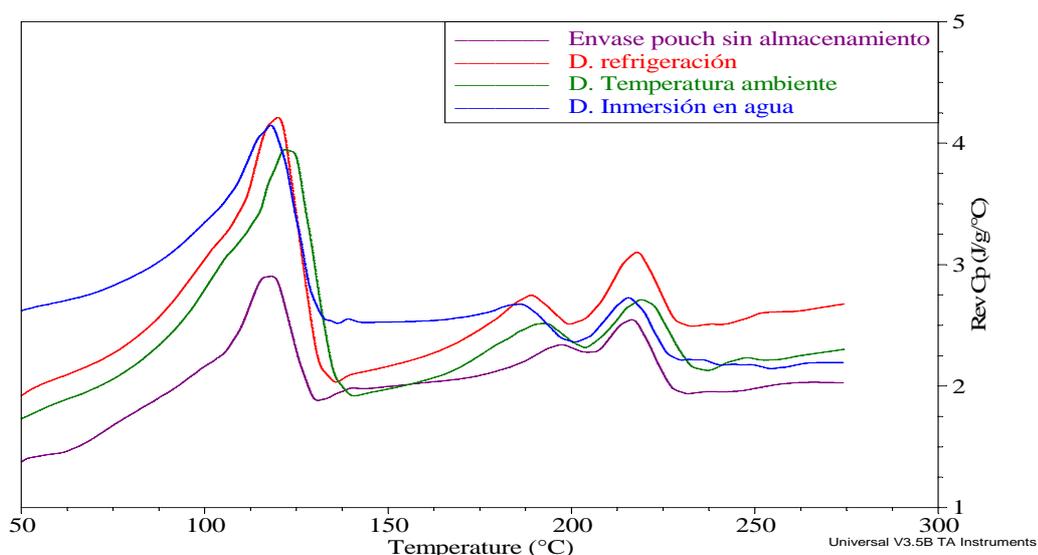


Figura 22. Comparativo de capacidad calorífica para todas las muestras

Además de que el comportamiento de la curva es similar se observa que la variación de Cp entre el material que no fue expuesto a bajas temperaturas y las muestras descongeladas es de 1 J/ g °C, lo que refleja que en el material existen pequeñas modificaciones estructurales que se hacen visibles por medio del análisis térmico; para corroborar lo anterior, es necesario comparar de forma global el comportamiento térmico del material de envase a lo largo de todas las condiciones a las que estuvo expuesto y cómo es que esto se manifiesta en las transiciones del mismo. A continuación se muestra dicha comparación en la figura 23:

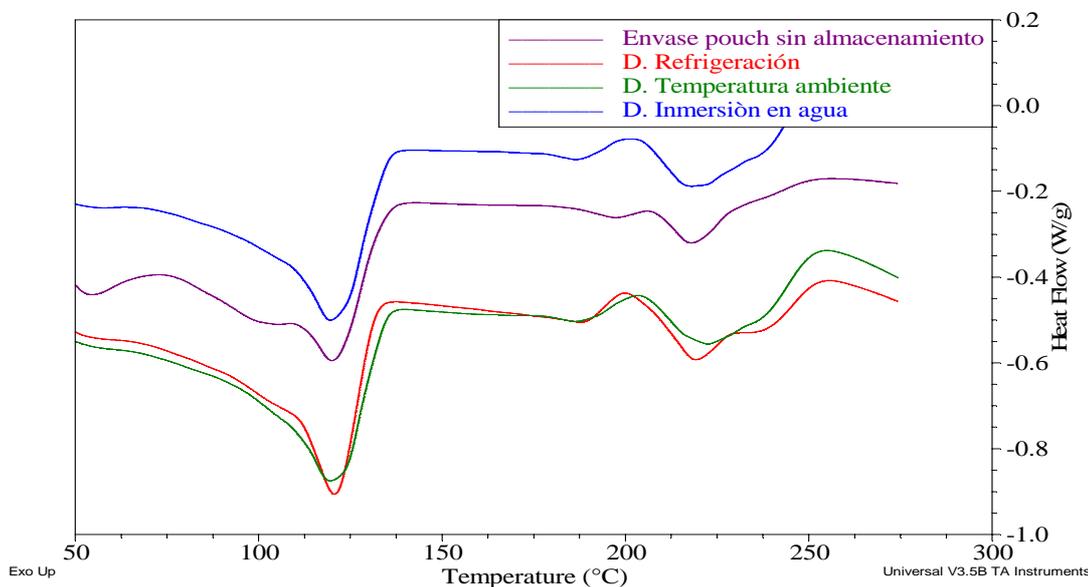


Figura 23. Comparativo global de flujo de calor total para cada una de las muestras

A partir de éste comparativo global se pueden visualizar los cambios que experimentó la película flexible multicapa, partiendo del calentamiento de referencia para el material que no fue empleado para congelación y almacenamiento y finalmente cotejado con las muestras sometidas a congelación/descongelación. El análisis térmico representativo de las cuatro muestras revela las mismas dos señales endotérmicas que fueron analizadas en un principio como puntos de fusión del material polimérico, lo cual conduce a las siguientes dos premisas:

- El comportamiento térmico de la película flexible multicapa no se modifica considerablemente al ser expuesto a temperaturas de congelación y descongelación.
- El tipo de descongelación es capaz de influir sobre las propiedades térmicas de la película flexible multicapa.

Para fortalecer estas premisas, a continuación se analizan los cambios que sufrió la película flexible en función a la entalpía de fusión para cada transición, el comparativo de estos valores se describe en la tabla 11:

Tabla 11. Entalpías de fusión para cada una de las muestras de la película flexible multicapa.

MUESTRAS	PRIMERA TRANSICIÓN		SEGUNDA TRANSICIÓN	
	T ° Fusión (°C)	Entalpía de fusión (J/ g)	T ° Fusión (°C)	Entalpía de fusión (J/ g)
Película no expuesta a bajas temperaturas	118.87	72.97	219.39	13.05
Película congelada y descongelada a T° de Refrigeración	120.6	54.74	217.86	7.66
Película congelada y descongelada a T° ambiente	120.10	59.84	223.33	22.43
Película congelada y descongelada por inmersión en agua	120.43	51.44	221.35	23.51

* Los ensayos se realizaron por duplicado, los valores que aquí se presentan son valores promedio.

Los valores presentados en la tabla 11 corroboran las premisas planteadas anteriormente, se observa que en cada una de las muestras almacenadas y descongeladas, el primer punto de fusión no se modifica considerablemente; sin embargo, los requerimientos energéticos presentan ciertas modificaciones, dentro de las más relevantes, la muestra descongelada a T° ambiente demanda mayor energía para alcanzar la fusión del material, mientras que la entalpía de fusión más baja corresponde a la muestra descongelada por inmersión en agua; a pesar de las variaciones que se encontraron, el punto de fusión del polietileno (primera transición) no se ve modificado.

Con base en los valores reportados, se observa que los principales cambios en el material, se dan en la segunda transición, es decir, la fusión del nylon 6-6 (poliamida), ya que este sufre un incremento que al mismo tiempo aumenta los requerimientos energéticos.

A pesar de que los puntos de fusión no se modifican drásticamente, en el caso de la muestra descongelada en condiciones de refrigeración, donde se tiene el punto de fusión más bajo, se tiene también una disminución representativa en la entalpía de fusión, requiriendo de menos energía, por lo cual se asume que este descenso es consecuencia de una nueva

distribución molecular, que puede reflejarse en un cambio de C_p , el cual se aprecia en la figura 22, donde la curva correspondiente a la muestra descongelada en refrigeración presenta un valor de C_p mayor que las otras muestras. El hecho de que tenga lugar un reordenamiento molecular mínimo puede ser explicado en base a los cambios que ocurren durante la descongelación, uno de los más sobresalientes: *la presencia de jugos exudados*. Durante la descongelación de las muestras, se observó que en condiciones de refrigeración, la muestra presentó la mayor cantidad aparente de jugos exudados debido a que se trató de un método prolongado en relación a los otros dos, lo cual dió lugar a una interacción entre los jugos liberados y la película flexible, de hecho se ha comprobado que todas las poliamidas absorben agua después de cierto tiempo, es así como comienza a darse una migración de componentes entre el sistema alimenticio envasado (carne) y la película flexible multicapa que contiene el nylon 6-6; dicha migración se manifiesta en un reordenamiento molecular a través de una transición pequeña que se observa en la figura 23.

Desde el punto de vista orgánico, la molécula de nylon 6-6 sufre un cambio de simetría que disminuye la movilidad de uno de sus grupos funcionales debido a la presencia de moléculas de agua, una vez que están compitiendo por los puentes de hidrogeno (Soto, H., 2000). Lo anterior comprueba que sí existe una migración de componentes, que si bien térmicamente no es relevante, existe la posibilidad de que modifique otras propiedades de interés por parte del material.

Si bien ya se discutió entre sí el comportamiento térmico de las muestras descongeladas por diferentes métodos, es importante comentar los cambios que experimentaron estas respecto del material de referencia (sin almacenamiento/descongelación), de entrada el parámetro más importante es que los puntos de fusión sí aumentan acompañados de cambios entálpicos debido al fenómeno de plastificación ya mencionado, como una consecuencia de la hidratación progresiva en la película, para la primera transición, el punto de fusión aumenta en un 2 % mientras que la entalpía de fusión disminuye en un porcentaje promedio de 23.6 % respecto a la referencia (película no expuesta a bajas temperaturas). En lo que se refiere a la segunda transición, los puntos de fusión varían 1.33 % respecto a la referencia, y la modificación más significativa se obtiene en los requerimientos entálpicos que se modifican 49.6 % promedio, estos incrementos en los puntos y entalpías de fusión iniciales y en ambas

transiciones, se atribuyen al proceso de interacción con los jugos exudados que se presentan en la descongelación (Zhang, Y. y Hang, H., 2006).

CONCLUSIONES

La medición de las propiedades mecánicas por medio la máquina universal INSTRON y la calorimetría diferencial de barrido con modulación de temperatura, son herramientas muy útiles en la evaluación del uso y/o funcionalidad de películas flexibles, dicha funcionalidad tiene impacto sobre la resistencia del material durante la distribución del producto, la preservación del sistema alimenticio envasado y los parámetros de calidad del mismo. A lo largo de este proyecto, la funcionalidad del envase se evaluó con base en esfuerzos mecánicos y térmicos bajo condiciones de congelación/descongelación, de lo cual se concluye que:

- La película flexible de referencia experimenta cambios mínimos después de ser expuesta a temperaturas de congelación, los cuales no se ven afectados por el método de descongelación empleado en las diferentes muestras.
- El fenómeno más importante que sufre la película flexible es la "plastificación" debido a un proceso de hidratación.
- El análisis calorimétrico reflejó que el fenómeno de plastificación sí modifica el comportamiento térmico de la película de envasado, afectando específicamente el punto de fusión de la poliamida (nylon 6-6).
- Los cambios más representativos en el punto de fusión, tienen lugar en la muestra que fue descongelada en condiciones de refrigeración.
- Por lo anterior, se concluye que el uso de los envases flexibles multicapa (polietileno + nylon 6-6), no está limitado a condiciones de envasado a vacío sumadas al almacenamiento en refrigeración, puesto que con ésta investigación se confirma que al someter al material a un conjunto de condiciones de temperatura que iniciaron con el almacenamiento congelado y que simulaban las fluctuaciones de temperatura a las que generalmente se encuentran expuestos los productos alimenticios en general, desde su producción hasta que llegan a los consumidores, este tipo de películas presenta alta resistencia térmica y mecánica para el envasado a vacío de carne de res fresca congelada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) [ASTM] American Society for Testing Methods, Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting, D-882, Annual book of American Society for testing methods, Philadelphia: ASTM, 313-321.
- 2) Baker, R., "Fundamentals of new food product development" Elsevier Science Publishers, EUA, 1998, 136-140.
- 3) Blixt, Y. and Borch, E., "Comparision of shelf life of vacumm- packet pork and beef". Meat Science 60, EUA, 1999.
- 4) Bonner, M., Saunders, L. and Ward, M., "Anisotropic Mechanical Properties of Oriented HAPEX", Journal of material Science, 37, 2002, 325-334.
- 5) Brown, W., "Plastics in food package" Propierties design and fabrication, EUA, 1992, 25-68.
- 6) Casp, A., "Procesos de conservación de alimentos", Mundiprensa, España, 1999, 295-230.
- 7) Chang, J., "Plasticizing.antiplasticizing effects of water on physical properties of tapioca starch films in the glassy state", Journal of Food Science, 65, 2000.
- 8) Colees, R., McDowel, D. and Kirwan, J., "Manual del envasado de alimentos y bebidas" Mundiprensa, España, 2004, 280-290.
- 9) Combellik, W., "Enciclopedia of Polymer Science and Engineering, Wiley, EUA, 1985, 176-192.
- 10) Deanin, R. "Polymer structure, propierties of polymer films" Cahners Books Boston, EUA, 1972.
- 11) Dickinson, E., "New phisicochemical techniques for the characterization of complex food systems" Blackie Academic & Professional, Inglaterra, 1995, 160-170.
- 12) Effenberger, G., "Empaquetado de la carne y productos cárnicos", Acribia, España, 2000, 54-60.
- 13) Eskin, M., "Food shelf life stability" CRC Press, Washington DC, 2001, 25-120.
- 14) Farchmin, G., "Inspección veterinaria de alimentos", Acribia, España, 1965, 61-71.
- 15) Fellows. P., "Food processing technology principles and practice", 2ª, Woodhead Publishing Limited, Inglaterra, 2000, 419-438.
- 16) Gascue, B. y Figueroa, A., "Caracterización de polietilenos obtenidos a partir de diferentes sistemas catalíticos de coordinación", Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, ISSN, 23, 2003.

- 17) Genot, G., "Congelación y calidad de la carne" Acribia, España, 2003 120-130.
- 18) Girard, J., "Tecnología de la carne y productos cárnicos" Acribia, España, 1991, 5-30.
- 19) Grffin, R., "Food packaging" Avi. Publishing Company, EUA, 1970, 95-107.
- 20) Halek, G., "Relationship between polymer structure and performance in food packaging applications" Food Science Department Rutgers University, EUA, 1998.
- 21) Heiss, R., "Principios del envasado de alimentos" Acribia, España, 1978, 25-315.
- 22) Hemminger, W., "Differential Scanning Calorimetry, an introduction for practitioners", Springer Verlag, 1996, 7-40.
- 23) Holm, V., Ndoni, S. and Risbo, J., "The stability of polylactic acid packaging films as influenced by humidity and temeperature" Jounal of food Science, 71, 2006.
- 24) Hong, L., Karim. A. and Choon C., "Effects of water.glycerol and water-sorbitol interactions on the physical properties of konjac glucomannan films", Journal of Food Science, 71, 2006.
- 25) Instron Corporation, "Soluciones para el ensayo de materiales", [Disponible en: www.instron.com y consultado en Julio 2007).
- 26) Jenkins, W., and Harrington, J., "Packaging foods with plastics" Technomic Publishing, EUA, 1991, 45-130.
- 27) Lawry, R., "Ciencia de la carne" 3ª, Acribia, España, 1998, 182.
- 28) Moron. O. y Zamorano, I., "Pérdida por goteo en carnes crudas", CIAD, AC, 11 (2), 2003,125-127.
- 29) Odian, G., "Principles of polymerization" 3a, Wiley, EUA, 19991, 88-114.
- 30) Parry, t., "Envasado de los alimentos en atmósfera modificada" Vicente Ediciones, España, 1995, 30-112.
- 31) Pérez, D. y Andujar, G., "Cambios de coloración en productos cárnicos", Instituto de Investigación para la Industria Alimenticia, 2000.
- 32) Quiroga, G., "Tecnología de carnes y pescados y manual de prácticas para planta piloto" UNISUR, Bogota, 1995, 19-63.
- 33) Robertson, G., "Food packaging, principles and practice" Marcel Decaer, EUA, 1993, 21-68.
- 34) Roudot, C., "Reología y análisis de textura de los alimentos" Acribia, España, 2004, 90-95.

- 35) Schultz, J., "Polymer cristalization" The development of crystalline order in thermoplastic polymers, American Chemical Society, EUA, 2001, 21-30.
- 36) Solis, A. y Arjona, J., "Evaluación del comportamiento calorimétrico del nopal (*Opuntia Picus Indica*) por DSC con modulación de temperatura, UNAM, FESC, Cuautitlán, 2006, 4-50.
- 37) Soto, H., "Migración de componentes de bajo peso molecular de bolsas de poliamida recomendadas para hornear alimentos" *Journal of Material Science Letters*, 19, 2000.
- 38) Spiau, J., "Valores normativos de la tecnología cárnica", Acribia, España, 1981, 43-53.
- 39) Tewari, G., Jayas, D. and Holley, R., "Centralized packing of retail meat cuts of shelf life of vacuum – packet pork and beef" *Meat Science*, 60, 2002.
- 40) Tschuschner, D., "Fundamentos de tecnología de alimentos", Acribia, España, 2001, 337.
- 41) Wulin, Q., Habenschuss, A. & Wonderlich, B., "The phase structures of nylon 6.6 as studied by temperature-modulated calorimetry and their link to x-ray structure and molecular motion" *SCP*, 48, 2007.
- 42) Zhang, Y. and Hang, H., "Mechanical and thermal characteristics of pea starch films plasticized with monosaccharides and polyols", Institute of Food Technologists, 2006.