



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio de la plastificación del poliestireno por oleína de palma.

Santiago Fajardo Ramírez

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá D.C.**

Estudio de la plastificación del poliestireno por oleína de palma

Santiago Fajardo Ramírez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos

Director:

Jairo Ernesto Perilla Perilla
Ingeniero Químico, M.Sc. Ph.D.

Línea de Investigación:

Biomateriales

Departamento Ingeniería Química y Ambiental
Grupo de Procesos Químicos y Bioquímicos.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá D.C., Colombia
2020

“Cualquiera que tenga sus deseos hará sus investigaciones”
Josiah Willard Gibbs

A mis padres como muestra de gratitud por su constante y permanente disponibilidad. A la Universidad Nacional de Colombia por brindarme el espacio para fomentar conocimiento y por consagrar en mí el cariño de mis compañeros estudiantes, docentes y de mi director de tesis.

Agradecimientos

Me encuentro totalmente agradecido con mi director de tesis el profesor Jairo Ernesto Perilla Perilla por dirigirme en el presente trabajo de manera excelsa, también por su constante apoyo en los procesos investigativos con los cuales he construido mi formación humana, ingenieril y científica.

Al profesor Jorge Orlando Manrique Perdomo al permitirme el acceso y el uso de los laboratorios de ingeniería química para el desarrollo de esta investigación

Al profesor Paulo Cesar Narváz Rincón por suministrarme la Oleína de Palma para la realización de mí estudio.

Agradezco al profesor Rodolfo Rodríguez Baracaldo por sus enseñanzas y sus conocimientos de ciencia e ingeniería y de materiales.

Agradezco a Ricardo Cortez Segura, auxiliar del laboratorio por su gran colaboración en el préstamo de materiales y asesoría en el uso de equipos del mismo.

Al departamento de Ingeniería Química y Ambiental, y al financiamiento parcial bajo el proyecto 37454 de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Les agradezco de sobremanera a mis compañeros del Grupo de investigación de Procesos Químicos y Bioquímicos, a los compañeros de introducción a la ingeniería de polímeros y Richard José Solano Gómez.

Resumen

La necesidad de detener la contaminación desmesurada por los polímeros de un solo uso, como el Poliestireno Expandido (EPS), y la pérdida acelerada de la calidad del agua por parte del aceite usado de cocina han motivado el estudio de los mecanismos de cambio de fase, así como de las propiedades mecánicas y morfológicas del efecto plastificante de la Oleína de Palma (OP) en el poliestireno. La metodología para la producción y caracterización de muestras plastificadas con OP fue por medio de técnica *Solvent-Casting*, en las cuales se varió la concentración de OP en el poliestireno. Posteriormente, se utilizaron los equipos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y termogravimetría (TGA) con el fin de definir los cambios de la temperatura de transición vítrea (T_g) y el delta del calor específico (ΔC_p) con el aumento de la concentración peso a peso (%p/p) de OP y la temperatura de degradación del compuesto. También se evaluaron los parámetros de producción de muestras físicas para la valoración de las propiedades mecánicas mediante la norma ASTM 638D y su comparación con el material recuperado. Por último, se realizó la microscopia electrónica de barrido (SEM) con el fin de observar la distribución de la OP en la matriz de PS. El hallazgo de dos fases presentes en el material de manera posterior a una concentración de OP de 5 %p/p se modeló mediante las ecuaciones planteadas por Fox al realizar la TGA a diferentes muestras de PS/OP, se halló una temperatura de degradación del compuesto fue mayor a los 300 °C, el flujo de extrusión osciló entre 5 y 28 g/L, la corriente de 5 a 10 A, las velocidades angulares del tornillo mantuvieron un promedio de 22,63 Hz y algunas temperaturas variaron entre 148 °C y 200 °C. Para las propiedades mecánicas, se obtuvo que el módulo de Young aumentó al incrementar la concentración de OP %p/p y alcanzó los 11,06 MPa. Finalmente, se obtuvo la morfología del compuesto PS / OP, que se encuentra disperso de manera discontinua en forma de cavidades esféricas.

Palabras claves: Poliestireno, oleína de palma, plastificación, fases, esfuerzo-deformación, morfología.

Abstract

The need to stop excessive contamination by single-use polymers, such as expanded polystyrene (EPS), and the accelerated loss of water quality due to used cooking oil has fostered the study of the mechanisms of phase change, as well as of the mechanical and morphological properties of the plasticizing effect of palm oil in polystyrene. For the study of phase changes, films were made using the solvent-casting technique, where the concentration of palm olein (PO) in the polystyrene was varied. DSC and TGA equipment were used to define the changes in glass transition temperature (T_g) and delta of heat capacity (ΔC_p) with the increase in PO and the degradation temperature of the compound. The production parameters of physical samples were also evaluated for the study of mechanical properties using the ASTM 638D standard and their comparison with the recovered material. Scanning electron microscopy (SEM) was performed in order to observe the distribution of the PO in the PS matrix. Before of 5%wt of PO in the matrix of polystyrene, show's two phases; a hard phase and soft phase, was modeled of the equations proposed by Fox to get a theoretical T_g . When performing the TGA on different PS/PO samples, a degradation temperature was higher than 300 °C, the extrusion flow varied between 5 and 28 g/L, the current from 5 to 10 A, the angular velocities of the screw were maintained an average of 22,63 Hz and temperatures ranged from 148 °C to 200 °C. For the mechanical properties, Young's modulus increased by increasing the concentration of PO%wt, thus reaching 11,06 MPa. Finally, it was obtained the morphology of the compound PS/OP, which is dispersed in a discontinuous manner in the form of spherical cavities.

Key words: Polystyrene, Palm Olein, plasticization, phases, stress-deformation, morphology

Contenido

Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
Introducción.....	13
Objetivo general y objetivos específicos.....	16
Marco Conceptual	16
Mecanismos de plastificación.....	16
•La teoría de lubricación	16
•La teoría Gelificación.....	17
•Volumen Libre.....	17
Solvent Casting.....	18
1.Materiales y métodos.....	19
1.1. Materiales.....	19
1.1. Métodos.....	19
1.1.1. Producción de mezclas.....	21
1.1.2. Caracterización térmica de los materiales.....	22
1.1.2.1. Caracterización térmica del OP.....	23
1.1.2.2. Caracterizaciones térmicas de las mezclas.....	24
1.1.2.3. Caracterización térmica de los gránulos.....	24
1.1.3. Caracterización de la degradación de las muestras.....	25
1.1.4. Extrusión de mezclas y granulado.....	25
1.1.5. Prensado de probetas.....	26
1.1.6. Métodos de tensión/deformación.....	26
1.1.7. Métodos de microscopía electrónica de barrido.....	27
2. Resultados y análisis.....	28
2.1. Caracterización calorimétrica para compuestos PS/OP.....	28
2.1.1. Características visuales de las mezclas.....	28
2.1.2. Calorimetrías	31
2.1.2.1. Calorimetrías grupo 1.....	31
2.1.2.2. Calorimetrías del grupo 2.....	32
2.1.2.3. Calorimetrías del grupo 3.....	33
2.1.2.4. Calorimetrías del grupo 4.....	34
2.1.2.5. Cambios para el OP.....	35

2.1.2.6.	Cambios para gránulos de PS/OP.	36
2.1.3.	Comportamiento vítreo de las mezclas PS/OP.	37
2.1.3.1.	Evolución T_g del compuesto en función del %OP.	37
2.1.3.2.	Temperatura de transición vítrea del compuesto.	38
2.1.4.	Análisis termogravimétrico para compuestos PS/OP.	39
2.2.	Manufactura de las muestras a evaluar.	42
2.2.1.	Parámetros de la línea de extrusión.	42
2.2.1.1.	Sistema de control de la extrusora.	42
2.2.1.2.	Termografías del sistema de extrusión.	45
2.2.1.3.	Análisis de flujo de los compuestos.	47
2.2.2.	Parámetros del prensado de probetas.	49
2.2.2.1.	Cambios de temperatura y presión de las muestras.	49
2.2.2.2.	Termografías del sistema de compresión.	53
2.3.	Comportamiento mecánico de los compuestos PS/OP.	54
2.3.1.	Esfuerzo y deformación para las mezclas PS/OP.	54
2.3.2.	Relación del módulo de Young con el porcentaje de OP.	55
2.4.	Estudio morfológico de los compuestos poliméricos PS/OP.	56
3.	Conclusiones y recomendaciones.	59
3.1.	Conclusiones.	59
3.2.	Recomendaciones.	61
	Bibliografía.	63
	Apéndice.	70
	Proyecto de reciclaje y caracterización mecánica.	70
	Cambios del módulo de Young con la temperatura de moldeo.	74
	Esfuerzo máximo a la falla de pisos típicos y el MOE-P.	74

Lista de figuras

Figura 1- 1: Caracterización de oleína de palma y producción de muestras	20
Figura 1- 2: Caracterización de muestras y proyecto de reciclaje	21
Figura 1- 3: a) Preparación de disoluciones de PS/OP en acetato de etilo b) Mezclas formadas en la caja de Petri.	22
Figura 1- 4: Equipo de calorimetría diferencial de barrido ubicado en el laboratorio de Polímeros.	23
Figura 2- 1: Película de PS/OP-100/0.	28
Figura 2- 2: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios el grupo 2.....	31
Figura 2- 3: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios el grupo 2.....	32
Figura 2- 4: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios para el grupo 3.....	34
Figura 2- 5: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios para el grupo 4.....	35
Figura 2- 6: Calorimetría de la oleína de Palma.	36
Figura 2- 7: Calorimetría de gránulos de PS.	37
Figura 2- 8: Variación de la fase dura, blanda y el modelo de Fox.	39
Figura 2- 9: Termogravimetría del compuesto PS/OP-0/100.	40
Figura 2- 10: Derivada de la termogravimetría del compuesto PS/OP-85/15	41
Figura 2- 11: Derivada de la termogravimetría del gránulo compuesto de PS/OP-95/5... ..	42
Figura 2- 12: Sistema ON/OFF para los compuestos de PS/OP de 95/5	43
Figura 2- 13: Sistema ON/OFF para los compuestos de PS/OP de 90/10	44
Figura 2- 14: Sistema ON/OFF para los compuestos de PS/OP de 85/15	45
Figura 2- 15: Termofotografías de varios segmentos de la extrusora (de izquierda a derecha): a) el cabezal de extrusión, b) la conexión con el barril, c) zona de compresión, d) zona de fusión, e) zona de transporte y f) zona de alimentación.	46
Figura 2- 16: Termofotografías frontal y lateral del polímero fundido.	47
Figura 2- 17: Flujo másico de los compuestos PS/OP a través del dado de extrusión. ...	48
Figura 2- 18: Variación de la presión del moldeo por compresión para diferentes referencias de PS.	49
Figura 2- 19: Variación de la temperatura del moldeo por compresión para diferentes PS	50
Figura 2- 20: Variación de la temperatura del moldeo por compresión para diferentes compuestos de PS/OP.....	51
Figura 2- 21: Variación de la presión del moldeo por compresión para diferentes compuestos de PS/OP.....	52
Figura 2- 22: Termofotografías del moldeo por compresión.	53
Figura 2- 23: Comportamiento de esfuerzo máximo de diferentes referencias de PS y concentraciones de OP en el PS DEXTON 525.....	54
Figura 2- 24: Comportamiento de la deformación máxima de diferentes referencias de PS y concentraciones de OP en el PS DEXTON 525.	55
Figura 2- 25: Módulo de Young con respecto al porcentaje de OP.	56
Figura 2- 26: Microscopía del compuesto PS/OP-85/15 a) 500 μm y b) 5 μm	57

Figura 2- 27: Microscopía del compuesto PS/OP-85/15 a) 10 μm y b) 5 μm	58
Figura A- 1: Laboratorio/taller de reciclaje de ARC y EPS.	70
Figura A- 2: Fabricación del MOE-130-E/Laboratorio de ingeniería química (LIQ) UNAL.	71
Figura A- 3: Baldosines del MOE-P	72
Figura A- 4: Comportamiento de esfuerzo último del MOE.	72
Figura A- 5: Comportamiento de deformación último del MOE.	73
Figura A- 6: Módulo de Young con respecto a la temperatura de moldeo.....	74
Figura A- 7:: Resistencia a la ruptura de diferentes materiales.....	75

Lista de tablas

Tabla 1- 1: Listado de materiales utilizados en el presente estudio.....	19
Tabla 1- 2: Tipos de muestras y su respectiva caracterización.....	19
Tabla 1- 3: Elementos del sistema de extrusión- tomado de (Jaíro E.Perilla, 1999).	26
Tabla 2- 1: Elaboración de mezclas Poliestireno/Oleína de palma	30
Tabla 2- 2: Elaboración de gránulos PS/OP	43

Introducción

La necesidad de desarrollar tecnologías innovadoras para los procesos de reciclaje, es cada vez más inminente en el campo de la ciencia de los polímeros, teniendo en cuenta los problemas de contaminación asociados al exceso de plástico en el planeta. (Juho Antti Sirviö, 2018). Debido a la producción actual de polímeros a nivel mundial, que supera los 348 millones de toneladas, duplicándose para 2035 (Nouha Bakaraki Turan, 2020). Actualmente más del 79% de los plásticos es dispuesto en rellenos sanitarios y alrededor del entorno, donde cerca de 2,41 millones anuales de toneladas de plásticos son acumulados sobre los océanos con predicciones de aumento hacia el futuro (Rakesh Kumar, 2021)

Por parte de la espuma de poliestireno expandido (EPS) la demanda mundial en 2010 fue de 14,9 millones de toneladas, creciendo a una tasa de 5,6 % hasta 2020, en donde el EPS al tener compuestos orgánicos que distribuidos en el ambiente (Wu, 2015), desprenden radicales como estirenos, diestirenos y diferentes derivados del EPS (Saido, 2015), provocando efectos de bioacumulación en la fauna (Mi Jang a, 2017). El EPS ha sido reconocido por ser el plástico más abundante en los residuos sólidos marinos en el planeta (Dehaut, 2016), donde es extremadamente estable degradándose muy lentamente a través de los procesos de foto degradación (S. Myint, 2010), oxidación, o abrasión mecánica (Marta Sendra, 2019). Debido a la gran producción de polímeros actualmente (Sjollema, 2016), la contaminación por micro plásticos ha empezado a introducirse en la cadena alimenticia humana comenzando por los alimentos de origen acuático. (Daniele de A. Miranda, 2016)

Actualmente en la ciudad de Bogotá y Colombia en general, el reciclaje de poliestireno expandido se ha dificultado principalmente por su transporte, debido a su baja densidad, lo que implica el incremento de los costos de combustible (M.D.

Samper, 2010) Sin embargo, el aprovechamiento se dirige hacia dos empresas, que principalmente se dedican a reutilizar el EPS, reciclando de 2010 a 2018 2.560 toneladas (García, 2019), por parte de IKOPORTEX¹ y una producción de resina de mediana calidad, para hacer reglas de niños por parte de la fundación Verde Natura² (Alejandra Agudelo Agudelo, 2017) (Peña, 2013).

El poliestireno es un polímero rígido (Cedron, 2014), de características químicas funcionales debido a que es un material apolar, inerte e hidrofóbico (Villarreal C. d., 2005). El Estireno proviene de la deshidrogenación catalítica del etilbenceno, obteniéndose un líquido incoloro, dicho catalizador es un sólido ácido, como zeolitas, alúmina y sílice-alúmina (Poletto, 2014), el cual se polimeriza por medio de radicales libres (Nhamo Chaukura, 2016). El poliestireno expandido proviene de un proceso de pre expansión, reposo intermedio y expansión final, el cual consiste básicamente en inflar las perlas de poliestireno con vapor de agua y pentano por encima de la temperatura de transición vítrea, que posterior a un tiempo de remanente de estabilidad, garantice que no haya residuos de pentano y agua, quedando una estructura celular dentro de las perlas, aumentando su volumen inicial 50 veces (Altan, 2017).

Diferente al poliestireno, otro contaminante a tratar en el presente estudio, es el aceite residual de cocina (ARC) (UK, 2014), en el que su composición mayoritaria es la OP al ser el aceite de mayor producción en el mundo (Mohd. Izham Hassan, 2021). El ARC sirve como alternativa de insumos químicos, teniendo ventajas en la resistencia a la radiación UV, la cual es importante para superficies de exteriores. Actualmente se han producido bioplastificantes basados principalmente en la esterificación, generando poliácidos de ARC con grupos funcionales éter etoxilados, los cuales han sido evaluados con el polivinil cloruro (PVC) valorando una notable disminución de su T_g de 67,9 °C hasta 33,3 °C (Jihuai Tan, 2019). Los plastificantes basados en petróleo pueden ser mejorados efectivamente con los aditivos basados

¹ <https://ikoportex.webnode.es/>

² <https://fundacionverdenatura.org/index.html>

en ARC, donde estudios previos han demostrado que mediante la transesterificación y la epoxidación se produce el 2-etilexil esterres derivados del ARC (Ting Zheng, 2018).

Teniendo las temperaturas de importancia (150 °C-170 °C), en el procesamiento se evalúan los dispositivos utilizados, realizando la mezcla física por medio de extrusión de los gránulos de PS impregnados de diferentes cantidades de OP, midiéndose así los parámetros de control y el flujo del material. En la elaboración de probetas para los ensayos mecánicos, se dispuso de una prensa para el moldeo por compresión, con la cual se midió la temperatura y presión del sistema. En cuanto a la caracterización mecánica de los compuestos PS/OP, se hicieron según la norma ASTM 638D, mostrando la influencia de la OP en la deformación, esfuerzo y módulo de Young.

Finalmente se realiza la caracterización morfológica del compuesto PS/OP-85/15, mediante microscopía diferencial de barrido (SEM), con el fin de observar la distribución de la oleína de palma alrededor del poliestireno expandido.

Objetivo general y objetivos específicos.

Objetivo general

Estudiar el efecto de aceites vegetales sobre la plastificación del Poliestireno (PS).

Objetivos específicos

- Analizar la solubilidad de los procesos para la preparación de mezclas de PS en aceites vegetales.
- Determinar las variaciones temperatura de transición vítrea (T_g) de las mezclas PS/aceite y definir modelos de ajuste.
- Evaluar las propiedades mecánicas para proyectar posibles aplicaciones.

Marco Conceptual

Mecanismos de plastificación.

La plastificación ocurre cuando un polímero es disuelto por solventes buenos o teta orgánicos no volátiles. Generalmente su función es ocupar volúmenes libres del ovillo estadístico, generando espaciamentos y mayor movilidad de las cadenas que constituyen el polímero(Wypych, 2017).

•La teoría de lubricación

La teoría de la lubricación consta del llenado de los espacios vacíos de la red molecular del polímero con el plastificante, lo que conlleva a la formación de planos paralelos entre la interfaz de las ambas sustancias; dichos planos son de fácil deslizamiento debido a diferentes fuerzas. Los planos producidos por el plastificante, son generados por la homopolaridad, creando diferentes tipos de enlace, esto conlleva a que los planos entre el plastificante y el polímero estén en función del hinchamiento, lo que a su vez modifica los enlaces dentro de las cadenas poliméricas. Según esto, hay dos tipos de planos, los que se generan dentro de la

fracción molecular (dentro del polímero), o en la frontera del polímero y del plastificante (Buong Woei Chieng, 2014)

•La teoría Gelificación.

En la gelificación se establece una relación entre los grupos polares del polímero y el plastificante, generando arreglos moleculares en el polímero solvatado dipolos de la cadena del mismo, donde en las colas no polares del plastificante, forman un espacio en el cual las cadenas polímero-polímero tienen una fuerte atracción, generando así una estructura de gel. Los plastificantes son generalmente cadenas alifáticas largas que tienen grupos funcionales voluminosos en su estructura molecular. Algunas cadenas, que poseen fenoles en su composición, no son efectivos a bajas temperaturas, pero con el incremento de la temperatura, suaviza más efectivamente el polímero. El efecto del plastificante, es producida en parte por la difusividad del mismo a través de las cadenas (Houghton, 1990).

•Volumen Libre.

El cambio del volumen libre y su aumento, va en función de la concentración del plastificante y la afinidad polar que tenga con el polímero. El primer efecto en el polímero es la reducción de la temperatura de transición vítrea, esto es debido a que las cadenas del polímero necesitan menos fuerza para reptar entre ellas. Los planos generados en las interacciones solvente-polímero, polímero-polímero, generan fronteras que favorecen el flujo de las cadenas dentro del ovillo, disminuyendo el T_g . La zona de temperaturas en la transición vítrea, para todos los polímeros su viscosidad es de 10^{12} Pa*s, por otro lado, el volumen ocupado en un gramo, extrapolando la materia al cero absoluto $V(T \rightarrow 0) = 0,7664 \text{ cm}^3/\text{g}$, donde para los polímeros en la región de transición vítrea es de $0,0646 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Icoz, 2008)

La fracción de volumen libre de un líquido se da por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{v_1}{v_0} \quad (1)$$

Donde v_1 es volumen libre y v_0 es el volumen ocupado.

Con la información obtenida, se puede relacionar el volumen ocupado, con la masa del plastificante y el polímero. La ecuación de Fox, muestra una relación de la temperatura de transición vítrea de la siguiente manera (Abbott, 2021):

$$\frac{1}{T_g} = \frac{M_p}{T_{g,p}} + \frac{M_{pl}}{T_{g,pl}} \quad (2)$$

Donde M es la masa y la T_g por cada p : plastificante y p : polímero, al reescribirlo queda:

$$M_p + M_{pl} = 1 \quad (3)$$

$$T_g = \frac{T_{g,p} * T_{g,pl}}{T_{g,pl} - (T_{g,pl} - T_{g,p}) * M_{pl}} \quad (4)$$

Teniendo dicha expresión, se para globalizar la T_g del compuesto polímero/plastificante, en términos de la concentración del plastificante y las temperaturas de transición vítreas de las fases blandas y sólidas del material de interés. Los criterios para seleccionar el material a plastificar son; la solubilidad con sus plastificantes y la temperatura de transición vítrea (Retrieval, 2021).

Solvent Casting

El Solvent Casting es una técnica empleada para hacer mezclas poliméricas utilizando un solvente orgánico, que al ser puesto en una lámina de vidrio la mezcla toma la forma de membrana o película al evaporarse el solvente (Deepalekshmi Ponnamma et al., 2018). Las características para escoger un solvente incluyen: heterogeneidad superficial, comportamiento de hinchado y tasas de deformación (Fazli Wahid et al., 2018)

1. Materiales y métodos.

1.1. Materiales.

Para la realización del presente estudio se tomaron en cuenta distintos materiales y sustancias las cuales están resumidas en la **Tabla 1- 1**.

Tabla 1- 1: Listado de materiales utilizados en el presente estudio.

Material	Propiedades reportadas	Proveedor
Acetato de etilo	$P_i = -4^\circ\text{C}^*$, $P_{ig} = 430^\circ\text{C}^{**}$	FPC
Poliestireno AmSty 678D	Índice de fluidez= 12 g/10min	DOW
Poliestireno DEXTON-525	Índice de fluidez= 8g/10min	DEXTON
Poliestireno DEXTON-535	Índice de fluidez= 4g/10min	DEXTON
Oleína de palma	Registro sanitario: AB181407	PALMALÍ

-*: Punto de inflamación- **Punto de ignición.

Las muestras utilizadas en el presente estudio son de diferentes tipos, partiendo de los dos compuestos de interés, donde en la **Tabla 1- 2** se observan las caracterizaciones por tipo de muestra.

Tabla 1- 2: Tipos de muestras y su respectiva caracterización.

Muestra	Caracterización
Película de PS/OP	DSC y TGA
OP sólida	DSC y TGA
Gránulos de PS/OP	DSC, TGA y SEM
Probeta	Esfuerzo/deformación

1.1. Métodos.

La metodología planteada en el presente estudio consta de 4 fases principales; 3 de experimentación científica y la cuarta de aplicación técnica de los resultados científicos. La caracterización de la oleína de palma fue hecha mediante referencias

bibliográficas, TGA y DSC. Para la producción de muestras se utilizó la extrusión y la técnica de solvent Casting, obteniendo gránulos y películas respectivamente. Al caracterizar las muestras, se diferenciaron en que para los gránulos se les realizó, microscopía SEM y ensayos mecánicos de esfuerzo/deformación. Terminando con el proyecto de reciclaje, que constó de la medición de propiedades mecánicas del poliestireno expandido plastificado con aceite residual de cocina.

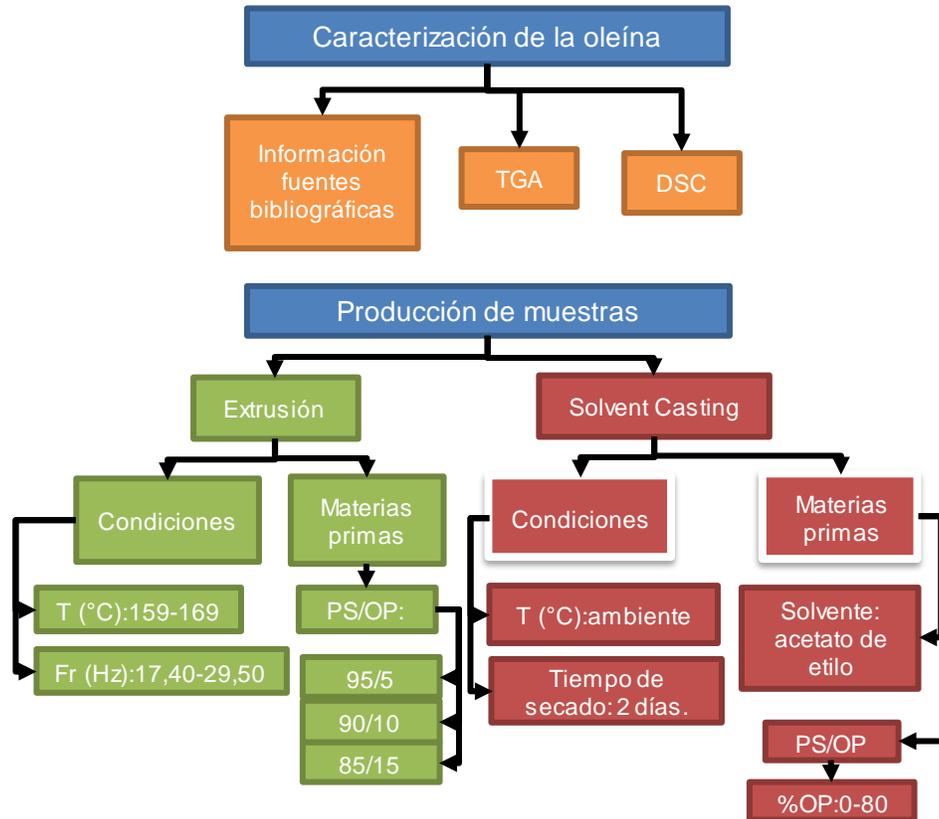


Figura 1- 1: Caracterización de oleína de palma y producción de muestras

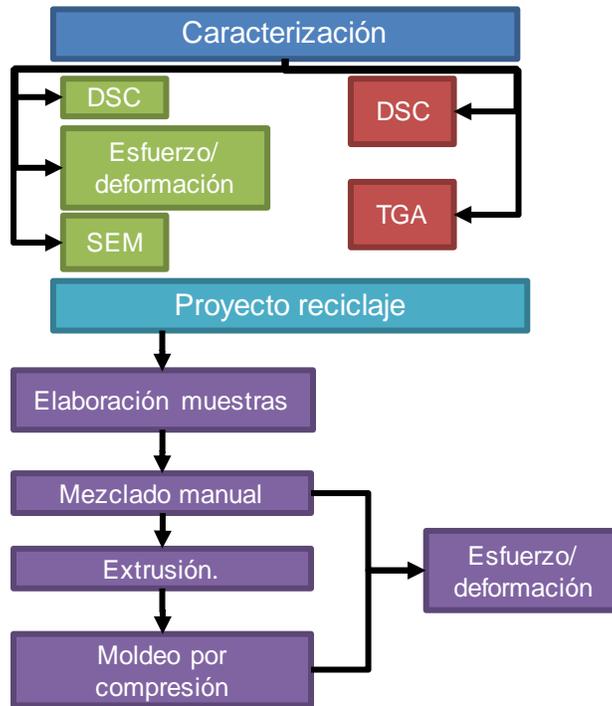


Figura 1- 2: Caracterización de muestras y proyecto de reciclaje

1.1.1. Producción de mezclas.

La preparación de las mezclas consistió en un sistema compuesto de un vaso de precipitado de 50 mL con un tubo de ensayo en su interior. Posteriormente tomada la tara del vaso de precipitado y el tubo de ensayo, se midió la OP utilizada con una micro espátula, puesto que la OP estaba en estado sólido. Después se introdujeron gránulos triturados de PS en el sistema hasta llegar a la masa requerida. Llegados a los 100 mg de muestra se agregó acetato de etilo con un volumen de 20 mL.

Los tubos de ensayo se almacenaron con la solución de PS/OP, por 2-4 días. Terminado hacer la solución se empezó a mezclar, mediante el dispositivo VORTEX, como se muestra en la **(Figura 1- 3-a)**. Posterior a 10-15 minutos de mezclado se vertió la solución en cajas de Petri, las cuales son dispuestas en una campana de extracción para volatilizar el solvente de manera segura. Pasadas 2-4 horas se puede observar las mezclas formadas como se confirma en la **(Figura 1- 3-b)**. Por último, se almacenan cubiertas con papel aluminio perforadas para llegar a evaporar el solvente residual que tenga la película final.

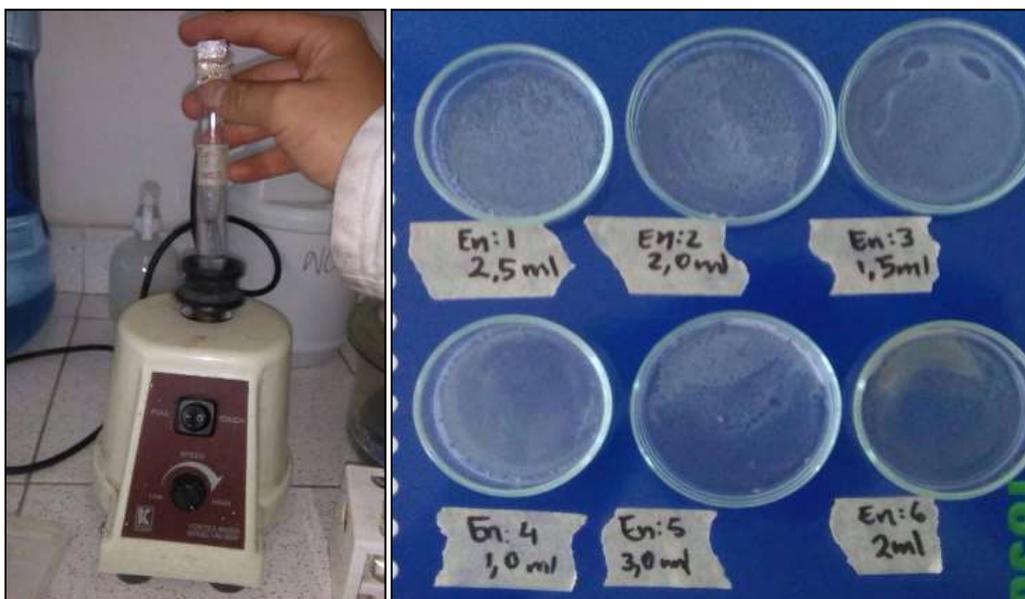


Figura 1- 3: a) Preparación de disoluciones de PS/OP en acetato de etilo b) Mezclas formadas en la caja de Petri.

1.1.2. Caracterización térmica de los materiales.

La temperatura de transición vítrea de las muestras se determinó mediante calorimetría diferencial de barrido, utilizando el equipo DSC 1 METTLER TOLEDO SW 13.00³ como se observa en la **(Figura 1- 4)**. Las muestras fueron cargadas en crisoles hechos de aluminio con una capacidad de 40 μ L.

³ Ficha técnica: https://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysis/TA-PDF/30129252_V02.14_DSC1_Bro_en_WEB.pdf



Figura 1- 4: Equipo de calorimetría diferencial de barrido ubicado en el laboratorio de Polímeros.

La masa de las muestras utilizadas en el DSC, variaron entre 10-15 mg a excepción de la OP, la cual pesó 3 mg. La naturaleza de los materiales fue: oleína de palma (OP), mezclas PS/OP en películas y gránulos de PS y PS/OP (Gutiérrez, 2014). Las muestras tenían diferentes características físicas; la oleína de palma al estar compuesta de: ácidos grasos saturados encontrándose en estado sólido, las películas fueron laminillas cerca⁴ de 0,385mm² apiladas en capas y los gránulos son secciones de filamentos entre 2 mm y 3mm de diámetro.

1.1.2.1. Caracterización térmica del OP.

La OP previamente estudiada por Paulo César Narváez Rincón et al., 2005 en el cual se definió la composición porcentual de la OP como: 15,8 %p/p de palmitato de metilo, 13,4 %p/p oleato de metilo, 17,4 %p/p monoglicéridos, 16,0 %p/p diglicéridos, 16,5 %p/p tripalmitina y 20,6 %p/p trioleina. Dentro del comportamiento termodinámico de la OP, se tienen diferentes fluctuaciones, esto se encuentra asociado a las temperaturas de fusión, por cada componente, señalando las propiedades de la materia prima utilizada.

El método utilizado para determinar las fases de la OP se caracterizó por un enfriamiento de la muestra hasta los -60 °C que garantizó su estado sólido. La velocidad de enfriamiento fue de 10 °C/min. Al llegar a los -60 °C se mantuvo en un

⁴ Área del crisol de 40µL-ficha técnica: https://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysis/TA-PDF/30208680E_V07.17_Tiegel_Brochure_en_LR.pdf

estado isotérmico para completar la solidificación de la OP. Finalmente se calentó con una tasa de 10 °C/min hasta llegar a los 60 °C registrando las transiciones de fusión de la OP.

1.1.2.2. Caracterizaciones térmicas de las mezclas.

Con el fin de explorar los fenómenos de cambio de fase al aumentar la concentración de OP% dentro del sistema, la caracterización térmica de las mezclas se realizó en 4 intervalos de temperatura distintas: En el primer caso se puede observar que el cambio de temperatura para poliestireno con un porcentaje de OP entre 0 %p/p y 15 %p/p se caracterizó por tener una velocidad de enfriamiento y calentamiento de 5 °C/min, empezando en 10 °C hasta 90 °C, teniendo cada segmento un tiempo de 20 minutos, dando un total de 1 hora.

Las concentraciones de OP que varían entre 20 %p/p y 50 %p/p tienen un método que consiste en un calentamiento desde -10 °C hasta 150°C con una velocidad mayor a la anterior de 10 °C/min. Cada trozo de este experimento tiene una duración de 18 minutos. Incrementando el intervalo de muestreo se realizó el método para fases ricas en OP, las cuales varían entre 55 %p/p hasta 65 %p/p OP empezando desde -20 °C hasta 170 °C, con una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min. El primer segmento tiene una duración de 20 minutos con una duración total de alrededor de 57 minutos. Por último, el intervalo con mayor porcentaje de OP varió desde 70 %p/p hasta 80 %p/p de OP comenzando desde una temperatura de -30 °C hasta 200 °C con una rampa de enfriamiento y calentamiento de 10 °C/min, logrando un tiempo por parte de 24 minutos llegando a un total de 72 minutos.

1.1.2.3. Caracterización térmica de los gránulos.

Para la elaboración de los métodos por cada gránulo se analizaron 2 referencias las cuales fueron de America Styrenics, en la fase pura y de DEXTON 525 con 5 % de OP. En el primero se utilizó un método que consistió en el crecimiento de la

temperatura desde -10 °C hasta 150 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

El tiempo de los experimentos tuvo una duración de 15 minutos para finalmente durar 45 minutos. El compuesto con 5 %p/p de OP se incrementó el intervalo de muestreo que consistió en un calentamiento con una tasa de 10 °C/min comenzando desde -10 °C, hasta llegar a los 200 °C, cada tramo es de un total de hora.

1.1.3. Caracterización de la degradación de las muestras.

En el análisis de degradación térmica del poliestireno y la oleína de palma se utilizó un equipo METTLER TOLEDO TGA SF/1100/268⁵, las muestras tuvieron un peso aproximado entre 15 y 25 mg.

Se realizaron tres métodos. El método para la OP empezó con un calentamiento desde 25 °C hasta 450 °C. Los gránulos plastificados de poliestireno con 5 %p/p de OP llegaron hasta los 500 °C. Por último, se realizaron a las mezclas de poliestireno con 15 % de OP un calentamiento hasta los 800 °C.

1.1.4. Extrusión de mezclas y granulado.

Se analizaron los parámetros de extrusión de control y el flujo de material extruido. Los ensayos se iniciaron en una extrusora de INDUSTRIAS CAMBER (**Tabla 1- 3**) que se precalentó por 1,5 horas hasta que llegaron al perfil de temperatura usado. Primero la extrusora se calentó y se introdujo a la tolva el material preliminarmente mezclado manualmente en proporciones: 5 %p/p, 10 %p/p y 15%p/p de OP para las referencias de poliestireno previamente nombradas.

⁵ Ficha técnica: https://www.mt.com/dam/non-indexed/po/ana/thermal-analysis/brochures/TGA2_Broch_en_30247078A_V07.18_Original_56423.pdf

Tabla 1- 3: Elementos del sistema de extrusión- tomado de (Jairo E. Perilla, 1999).

Característica	Dimensión
Longitud del tornillo (cm)	69,2
Longitud zona de alimentación del tornillo (cm)	31
Longitud zona de dosificación del tornillo (cm)	24
Diámetro externo del tornillo (cm)	37
Altura del filete zona de alimentación (cm)	7,1
Altura del filete zona de dosificación (cm)	2,1
Ángulo de hélice	17,7°
Diámetro interno del barril (mm)	37,3
Zonas de calentamiento barril	2

Las proporciones medidas, se introdujeron en la tolva de la extrusora, se tomaron los datos de la caja de velocidades, como son el voltaje de línea y la frecuencia. Posteriormente se trituró el material obtenido mediante fracturas manuales previas, mediante una canaleta de enfriamiento con agua. El material extruido salió en forma de filamentos que fueron pasados debajo del agua, donde al otro extremo se jalaban por una máquina de trituración. El material obtenido se cortó en gránulos, los cuales salieron de la masa extruida durante 3 a 5 minutos, variando para cada contenido de OP %p/p y referencia.

1.1.5. Prensado de probetas.

El moldeo por compresión comenzó por tomar los gránulos pre-extruidos y disponerlos en las 7 cavidades de un molde con alrededor de 70 g de gránulos. Continuando se colocaron dentro de las 2 placas de la prensa, esta se programó con una temperatura para ambas placas entre 150 y 200°C y una presión entre 250 a 300kg/cm², registrando los cambios de temperatura y de presión durante 1-2 horas de moldeo.

1.1.6. Métodos de tensión/deformación.

Para la caracterización mecánica de los materiales se evaluaron ensayos de esfuerzo y deformación, estos se realizaron en la máquina universal de ensayos

AG-IS SHIMADZU⁶ con una celda de carga de 5 KN. El ensayo consistió en evaluar el comportamiento elástico del material, puesto que la región plástica del material es inexistente debido a que su T_g está por encima de la temperatura ambiente, para ello se utilizó un extensómetro que garantizó la medida adecuada del material.

Las probetas se tomaron con las dimensiones de la norma técnica de materiales ASTM-638D Tipo 1 debido a que los tipos de 1 a 3, son para polímeros rígidos y semi rígidos (ASTM, 2014). La geometría de estas muestras tiene las siguientes dimensiones: longitud del cuello de 50 mm, también de a los 13,5 mm y 4,2 mm de ancho y espesor respectivamente (Diosdado de la Peña José Angel, 2011), el método utilizado para dicho estudio fue un alargamiento de la mordaza superior a una tasa de deformación de 1,0mm/min. Debido a que la muestra está en estado vítreo se necesitó ver con claridad los mecanismos de falla utilizando un extensómetro SIE-560A/560SA⁷, el cual provee la repetitividad de los ensayos efectuados.

1.1.7. Métodos de microscopía electrónica de barrido.

La morfología de la superficie de ruptura del gránulo de PS/OP se observó por medio de un microscopio electrónico de barrido (FEI Quanta 200⁸) operado en alto vacío (3×10^{-7} torr) y una potencia de 10,0kV

Todos los materiales y equipos se encuentran ubicados en las instalaciones de los laboratorios de Polímeros edificio 412, 1^{er} piso, ensayos mecánicos edificio de Postgrado de Materiales y Procesos (407), Primer piso y laboratorio de física Edificio 404 Laboratorio 113 de la Universidad Nacional de Colombia Carrera 45 # 26-85 sede Bogotá D.C. (Colombia).

⁶ Ficha técnica: <https://toaz.info/doc-viewer>

⁷ Información detallada: <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm-consumables/sie-560a560sa/index.html>

⁸ Información detallada: http://www.linan-ipicyt.mx/Microscopio_de_Barrido.html

2. Resultados y análisis.

2.1. Caracterización calorimétrica para compuestos

PS/OP.

2.1.1. Características visuales de las mezclas.

Teniendo en cuenta la película de PS/OP-100/0, mostrada en la **Figura 2- 1**. como blanco, compuesta de PS con una concentración de OP de 0%p/p, realizando las observaciones de los cambios de la película al aumentar la concentración de OP. Este blanco se caracteriza por su transparencia y fragilidad, típica del poliestireno. Cabe anotar que la muestra no se adhirió al vidrio, por su naturaleza apolar atribuida por los grupos fenilos (Avila, 2013).

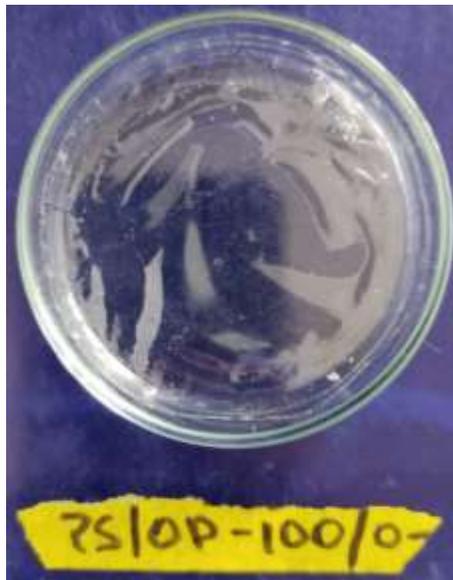


Figura 2- 1: Película de PS/OP-100/0.

La elaboración de mezclas varió las concentraciones de OP cada 5 %p/p, desde 0 %p/p hasta 100 %p/p. En la **Tabla 2- 1** se encuentran las características visuales y de textura que poseen las los compuestos de cada grupo. El primer grupo se caracterizó por la transparencia de las películas y aparición de opacidades heterogéneamente, las películas del 2^{do} fueron rígidas, translúcidas y un aumento de la distribución de las opacidades. El 3^{er} grupo de películas perdieron su rigidez,

presentando un aumento en la plasticidad y el contenido de OP opacó la totalidad de la muestra. Ya para el 4^{to}, no surgió formación de película, encontrándose fragmentos blancuzcos distribuidos heterogéneamente. masa tomada es experimental para cada compuesto respectivamente, seguida de la masa total medida, reflejando la efectividad de la técnica empleada para la elaboración de películas (J.A. Durães, 2006).

No	Grupo 1					Grupo 2							Grupo 3			Grupo 4						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
PS (mg)	100	98,1	95,1	90,2	85,6	80,6	75	70	65	59,9	55,2	50	45,5	40,2	35,2	30,1	25,1	20,1	15,2	10,2	5,1	0
OP (mg)	0	1,9	5,2	10,2	15,2	20,2	25,2	30,7	35	40,3	45,1	49,8	55,9	60,7	64,8	70,2	75	79,9	85	90,2	95,4	100,7
Masa total (mg)	100	100	100,3	100,4	100,8	100,8	100,2	100,7	100	100,2	100,3	99,8	101,4	100,9	100	100,3	100,1	100	100,2	100,4	100,5	100,7
Observaciones	Película rígida y transparente con leves opacidades al aumentar OP.					Película rígida y traslucida.							Pierde rigidez y es opaca.			No hay formación de película mostrando fases continuas de OP y discontinuas de PS.						

Tabla 2- 1: Elaboración de mezclas Poliestireno/Oleína de palma

En lo que concierne a la variabilidad de las muestras tomadas se puede concluir que la mayoría de mezclas medidas se encontraron dentro de la desviación estándar de $\pm 0,37$ %p/p. No obstante, la desviación inferior se encuentra cercana a los 100 mg, lo que indica que la mayoría de las muestras se realizaron por sobre este valor, garantizando que las mezclas tengan las proporciones adecuadas de OP y PS.

2.1.2. Calorimetrías

2.1.2.1. Calorimetrías grupo 1.

Los resultados de las calorimetrías para las películas de PS con OP son mostradas en la **Figura 2- 2** La inclusión de OP conduce a cambios importantes en el perfil de exploración del PS (Airtón Germano Bispo-Jr, 2018), encontrando eventos térmicos correspondientes al efecto plastificante de la OP indicado, por la reducción del T_g del PS en un intervalo de concentración desde 0 %p/p a 5 %p/p de OP teniendo su T_g de 83,48 °C a 74,57 °C correspondientemente. Al incrementar la concentración de OP hubo separación de fases (Daniela Schlemmer, 2007), entre; 10 %p/p con 2 T_g de 72,03 °C y 36,07 °C, y para 15 %p/p, con 2 T_g de 65,33 °C y 35,85 °C.

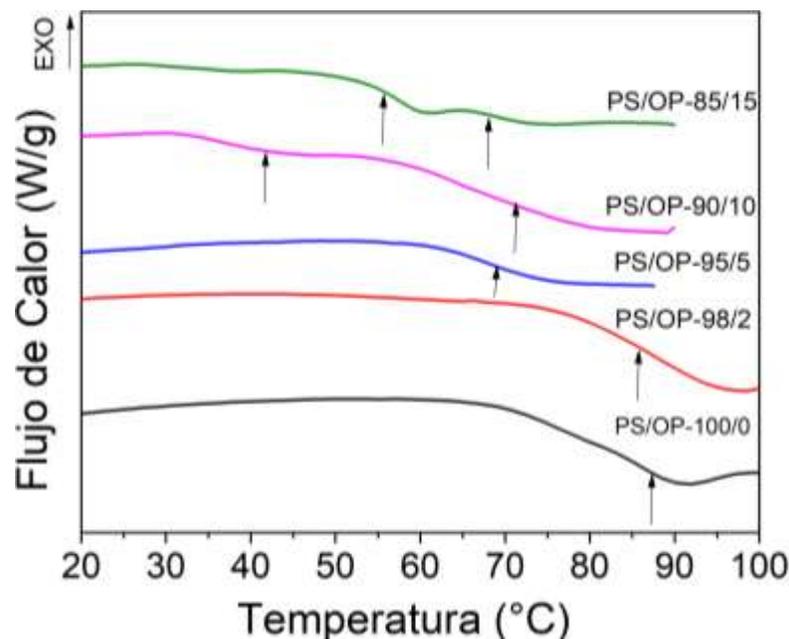


Figura 2- 2: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios el grupo 2.

La diferencia de las temperaturas de transición vítrea (ΔT_g) en concentraciones de OP de 10 %p/p y 15 % p/p, fueron de 27,66 °C y 21,11 °C respectivamente, como lo encontró Kailong Jin et al., 2015, donde midió dicha ΔT_g de la mezcla de poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)/polystyrene (PPO/PS) para una relación %p/p de 85/15 de 20,3 °C. Las ΔT_g , encontradas hubo miscibilidad, al poseer interacciones atractivas, débiles y fuertes dependiendo de la concentración.

2.1.2.2. Calorimetrías del grupo 2

En la **Figura 2- 3** se aprecian los cambios del calor en función de la temperatura para el segundo ciclo de calentamiento, por cada concentración de OP. Se observó que hay dos cambios característicos cerca a los 35 °C y a los 72° C, para los 20 % de OP, las variaciones de calor en las dos temperaturas, son menores que en las concentraciones de 20 °C a 45 %p/p. Se puede notar que al aumentar el contenido de OP en la matriz de poliestireno los picos tienden a unirse. Dicho comportamiento refleja la tendencia de converger en una fase estable, cabe anotar que dicha fase, sería de un contenido homogéneo de OP, es decir 100 %OP (Paola Rizzo, 2005).

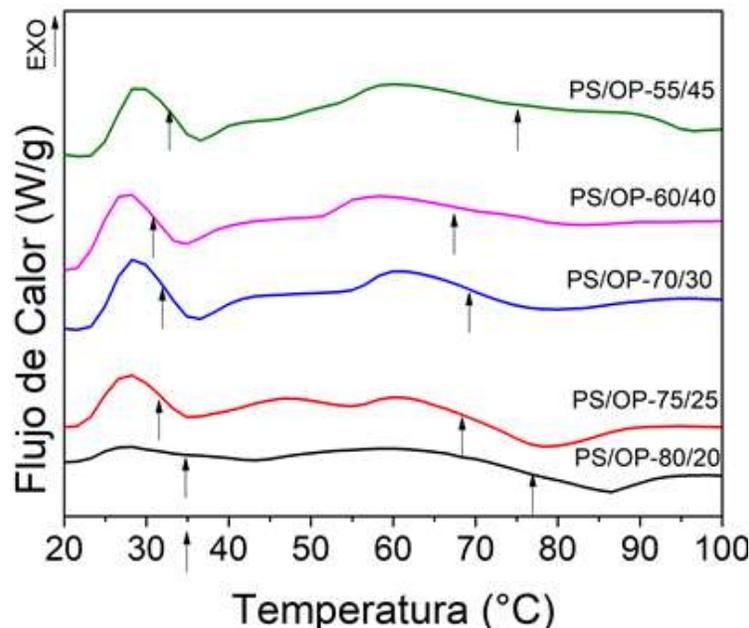


Figura 2- 3: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios el grupo 2.

Al observar que la pendiente de las variaciones de segundo orden en el momento de hallar las T_g , se percibe que la diferencia para la fase blanda es de un cambio más rápido que la segunda fase. Esto se debió a que la solubilización de la fase del polímero tiene menor número y peso molecular que la fase dura, que solubiliza la proporción de OP, dicha energía requiere más temperatura para el cambio, al ser las cadenas de poliestireno mucho más largas que los triglicéridos de ácidos grasos de la OP (Guodong Liu, 2014).

2.1.2.3. Calorimetrías del grupo 3

Los cambios anteriormente mencionados se pueden observar en la (**Figura 2- 4**) donde se muestra los comportamientos de cada curva de nivel, variando la composición de OP dentro de la matriz polimérica se pueden identificar que a la concentración los puntos de inflexión, tienden a alejarse en un intervalo cerrado de temperatura. En general se pudo identificar varios cambios de segundo orden siendo el primero cerca a los 15 °C, dicho cambio, fue asociado a la fusión del aceite, en el que se evidenció las T_g tanto de la fase blanda y dura del compuesto polimérico evaluado. Es importante resaltar que en las curvas, al incrementar el porcentaje de contenido de OP, el primer máximo entre 15 °C y 20° C, aumentó su magnitud, traduciéndose en la dependencia de la temperatura de fusión con el aumento de la concentración de OP dentro del compuesto PS/OP, en experimentos similares Hee Jeung Oh et al., 2014 encontró que las T_g entre -20 °C a 80 °C, los polímeros tienen propiedades higroscópicas, los cuales poseen la capacidad de controlar la humedad.

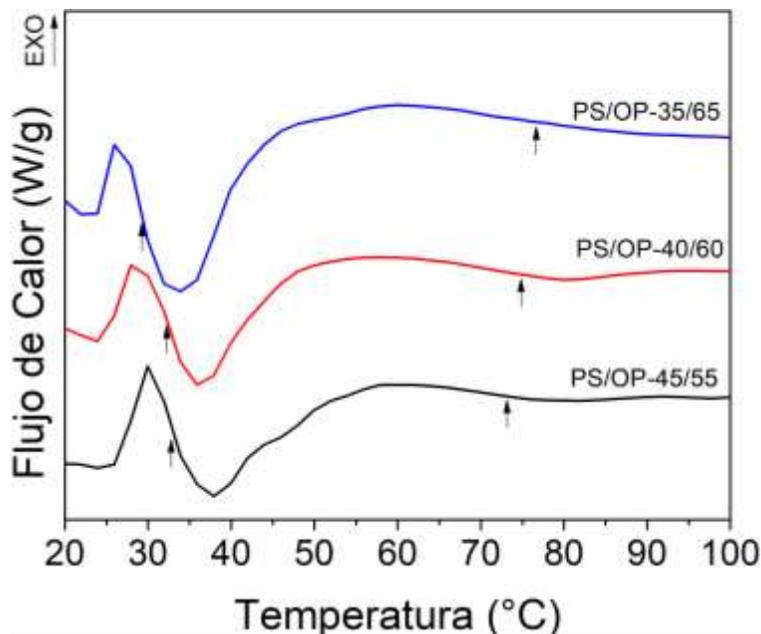


Figura 2- 4: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios para el grupo 3.

2.1.2.4. Calorimetrías del grupo 4

Analizadas las concentraciones de mayor contenido de OP dentro de la matriz compuesta de PS para los porcentajes de OP; 70, 75 y 80%p/p. Los cambios calorimétricos asociados con las fases se pueden hallar mediante la T_g que comprende los cambios de segundo orden y la pendiente de la tangente del punto de inflexión es la capacidad calorífica (ΔC_p). Jinge Li et al., 2009 encontró que la relación de la T_g sobre la longitud de los las cadenas laterales, que en el presente caso serían los grupos fenilos del PS y los ácidos. grasos del OP.

Se observa un pico exotérmico característico cercano a los $-10\text{ }^\circ\text{C}$ para los 80 %p/p de OP para la fase blanda, mientras que la fluctuación de la fase dura fue de menor energía, al reducirse la proporción de OP dicho pico tiende a reducirse drásticamente, este pico se da por la predominancia de la temperatura de fusión del OP que, al dejar de solubilizar el PS toma mayor relevancia (**Figura 2- 5**). Para las T_g de la fase blanda se denota que hay una reducción conforme aumenta la composición de OP y contrariamente el ΔC_p tiende a aumentar. Para la fase dura se muestra un comportamiento diferenciado como resultado que hay cambios de segundo orden dentro del intervalo de concentraciones para los altos % de OP.

Esto se puede ver asociado a sub fases o fases intermedias, cambiando las diferentes capacidades de disolución entre las fases. No obstante, los cambios de segundo orden que aparecen a una temperatura cercana de los 40 °C, levemente se puede observar que solamente para las concentraciones de OP de 70 %p/p y 65 %p/p las T_g se ve un cambio cercano a los 70 °C (Shiming Chena, 2004).

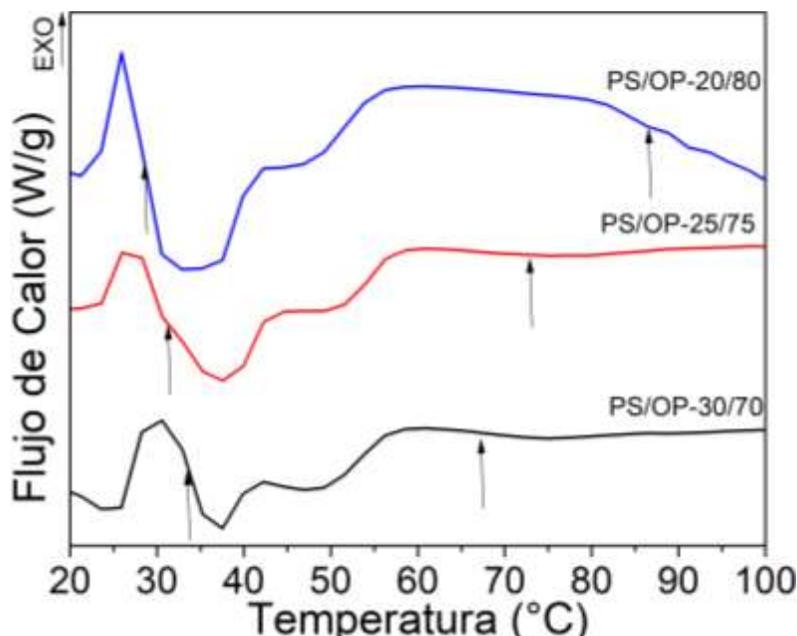


Figura 2- 5: Variación del estado dependiente de la temperatura para cada concentración de OP, cambios para el grupo 4.

2.1.2.5. Cambios para el OP.

La calorimetría de la OP, se caracterizó por tener 2 picos que ocurrieron en 4 °C y en 33 °C Como se observa en la **Figura 2- 6** según Fabiania et al., 2020 hay presencia de ácidos grasos saturados y monoinsaturados puesto que el primer pico lo encontró a 3,25 °C y el segundo pico a 33,85 °C. Otros autores como es el caso de Patrick A. Leggieri et al., 2018, encontró un pico a 2,85 °C el cual asoció al triacetín.

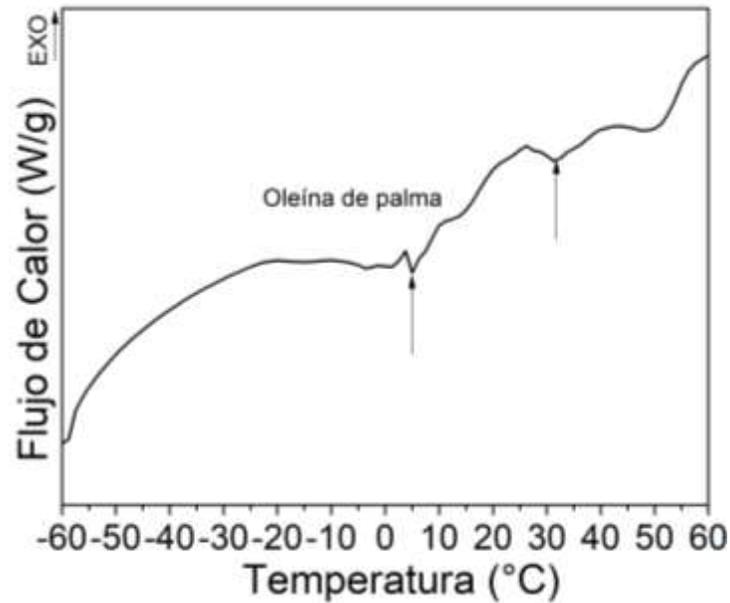


Figura 2- 6: Calorimetría de la oleína de Palma.

2.1.2.6. Cambios para gránulos de PS/OP.

La T_g de los gránulos del PS DEXTON 525, dieron un resultado cercano a los 93 %, posterior a al segundo ciclo de calentamiento. Similar a lo que realizó (Niranjan Patra, 2013), para su poliestireno, el cual analizo 6 ciclos de calentamiento y estos como afectaban a su vez, el material de referencia a utilizar, el PS, encontrando una oscilación entre el primer ciclo con una T_g de 106,96 °C hasta 108°C al sexto ciclo, indicando la ausencia de agua, al ser un material higroscópico.

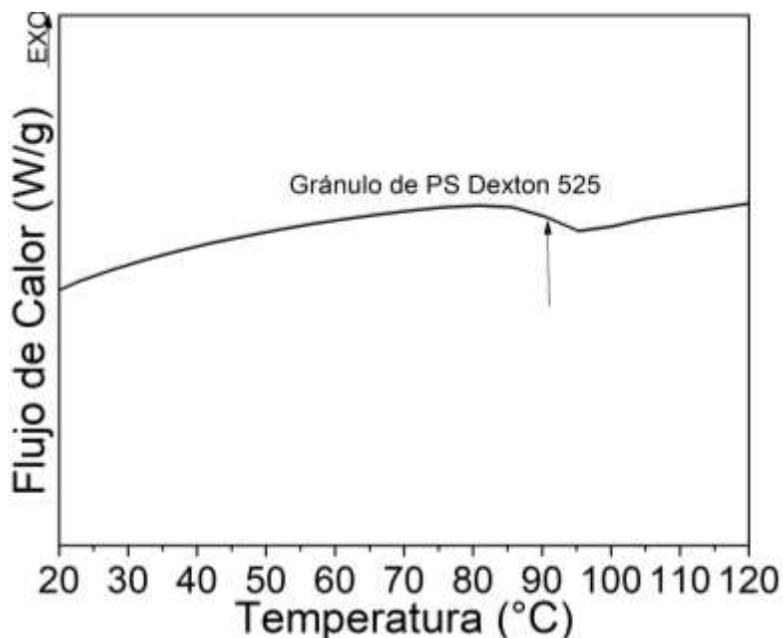


Figura 2- 7: Calorimetría de gránulos de PS.

2.1.3. Comportamiento vítreo de las mezclas PS/OP.

2.1.3.1. Evolución T_g del compuesto en función del %OP

A lo largo del estudio se ha visto el comportamiento térmico del compuesto de poliestireno y la oleína de palma a diferentes ciclos de calentamiento y la composición del plastificante. Dichos cambios tienen la diferenciación en segundo orden de las primeras variaciones, mostrando la T_g con su ΔC_p asociado. Recopilando dicha información se realizó el análisis del cambio de la T_g en función de la composición porcentual de la OP. La principal característica a denotar es la aparición de dos fases, identificadas como blanda y dura, alrededor del 10 %p/p de OP. Bifurcando la curva en 2 partes (**Figura 2- 8**), la curva inferior es la fase blanda y la superior se identifica como la fase dura del compuesto (M. Erber, 2010).

La curva tiene un mínimo local cercano a los 15 %p/p de OP dicho cambio se asocia a la lubricación de las cadenas de PS que al aumentar su porcentaje mantiene la T_g de la fase dura cercana a los 70 °C hasta llegar a un porcentaje de 50 %p/p OP, el cual debe ser por la sobresaturación del sistema, llegando hasta un pico de 100 °C, seguido de un segundo máximo ubicado a un porcentaje cercano a los 70 %p/p de OP.

Finalmente hay un cambio creciente terminando de aumentar la temperatura después del 80 %p/p de OP (Yohei Miwa, 2018). Para el caso de la fase blanda se observa un primer pico cercano al 15%p/p sin un cambio significativo menor a 3 °C. Posteriormente al aumentar la concentración de OP se observa un máximo que llega hasta los 50 °C cayendo la temperatura y manteniéndose relativamente constante hasta un mínimo local de menor significancia cercano a los 65 %p/p. Las interacciones físicas y químicas de los porcentajes de OP asociados a cada fase, principalmente los dos máximos locales, exhiben propiedades termodinámicas asociadas a la solubilidad del compuesto (S. Zeeb and S. Hijring, 1997).

2.1.3.2. Temperatura de transición vítrea del compuesto.

Al utilizar el modelo de Fox con las transiciones vítreas de la fase blanda y dura, se observadas en la **Figura 2- 8**, como se ajusta a los fenómenos, al encontrarse dentro de la región Blanda/dura, esto es muy importante, debido a que se pueden tomar las variaciones teóricas del modelo, para entender los parámetros de procesamiento a través de las concentraciones que varían de 10 %p/p de OP y 75 %p/p de OP, es así que al utilizar el modelo, se determinó que las concentraciones en las cuales el sistema estable se encuentran entre 20 %p/p y 30 %p/p de OP (Hee Jeung Oh B. D., 2014).

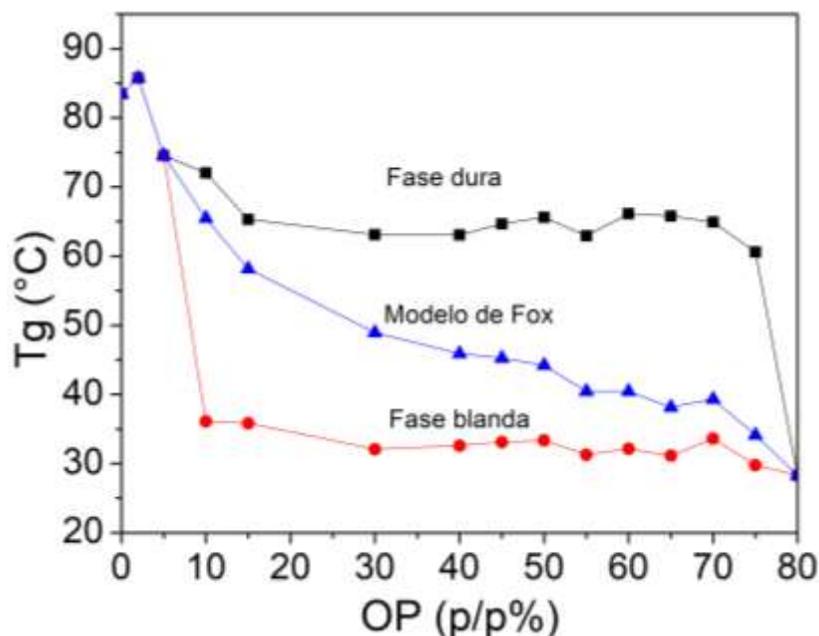


Figura 2- 8: Variación de la fase dura, blanda y el modelo de Fox.

2.1.4. Análisis termogravimétrico para compuestos PS/OP.

En cuanto el estudio termogravimétrico es muy importante puesto que se necesitó conocer la temperatura de degradación de los compuestos para asegurar el procesamiento. Se midió la OP con una masa de 18,473 mg en un intervalo de calentamiento desde los 25 $^{\circ}\text{C}$ hasta los 425 $^{\circ}\text{C}$, en el cual empieza a degradar la OP en los 280 $^{\circ}\text{C}$, teniendo un cambio de segundo orden a una temperatura de cercanos a los 390 $^{\circ}\text{C}$. Este intervalo de temperatura muestra la resistencia del aceite a la degradación (**Figura 2- 9**), la cual es caracterizada por el enlace éster entre el glicerol y los ácidos grasos (Dominik Brecht, 2019).

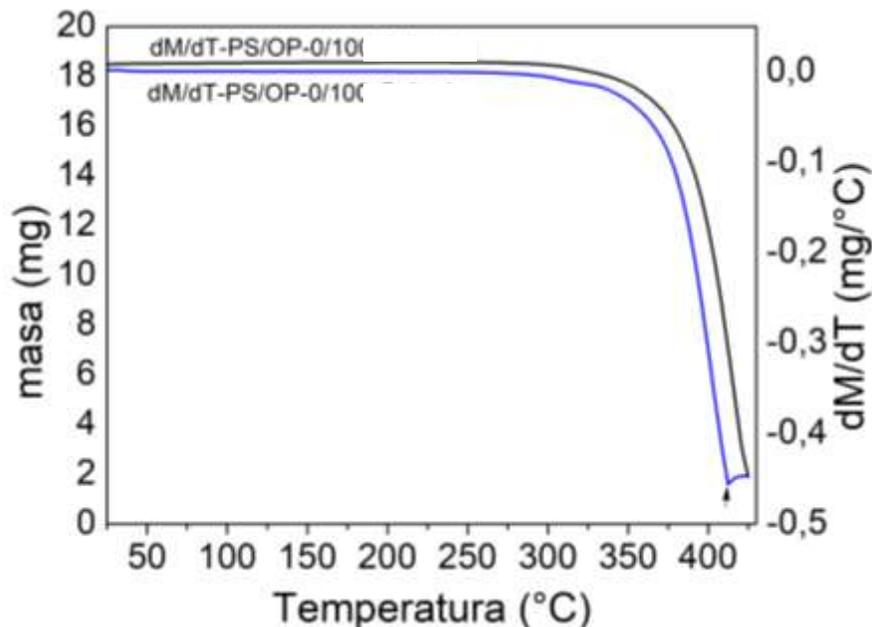


Figura 2- 9: Termogravimetría del compuesto PS/OP-0/100.

Continuando con el análisis se comprueba mediante la termogravimetría la funcionalidad de las mezclas fabricadas en las cuales se denota que el experimento tuvo un intervalo de temperatura de 25 °C a 800 °C con una masa de material de 12,1312 mg, el cual se calentó a una tasa de 20 °C/min. Se puede denotar que el material inicia un proceso de degradación cercano a los 190 °C. Esta curva se caracterizó por mostrar un comportamiento de disminución en la masa en dos puntos de inflexión (**Figura 2- 10**) indicando el desprendimiento de los compuestos de OP. Por medio de la derivada de este comportamiento se podría establecer que los puntos de inflexión se dieron a unas temperaturas cercanas a los 300 °C, 378 °C y de 425 °C (Halina Kaczmarek, 2008).

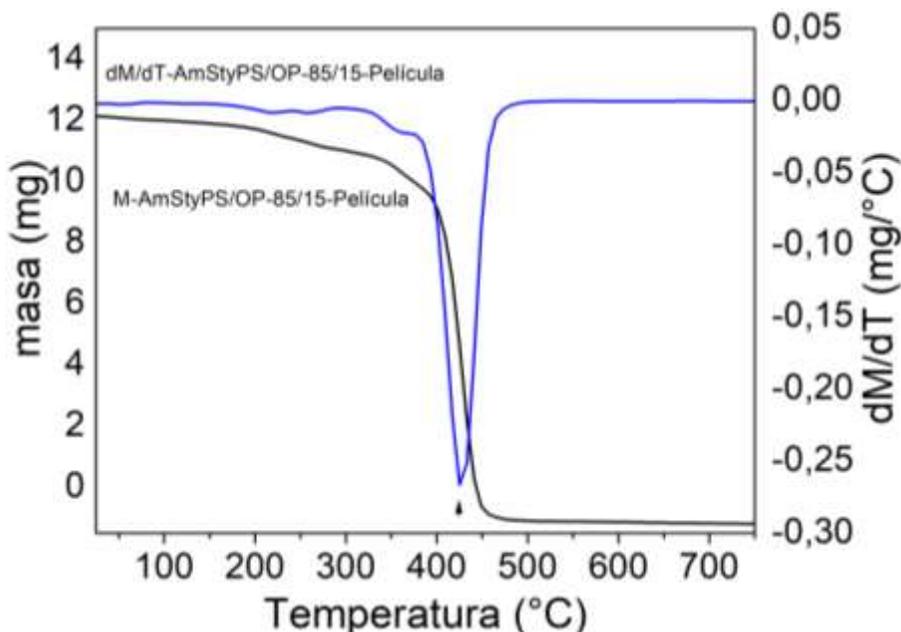


Figura 2- 10: Derivada de la termogravimetría del compuesto PS/OP-85/15

Los cambios de masa inicial de 24,116 mg descritos por el compuesto de poliestireno hecho mediante mezcla física a través de la extrusora con un 15 %p/p de OP, no muestran una migración previa de la OP, variando dentro de un intervalo de 25 °C a 800 °C, en el cual presenta un decrecimiento de la masa desde una temperatura de 360 °C. Lo anterior se puede evidenciar en la derivada, que determina el punto de inflexión que se encuentra ubicado cercano a los 435 °C. Evidentemente la resistencia térmica del polímero es mucho mayor a la OP (**Figura 2- 11**) debido a los movimiento vibracionales de largo alcance que tienen las cadenas (Guido Grause, 2013).

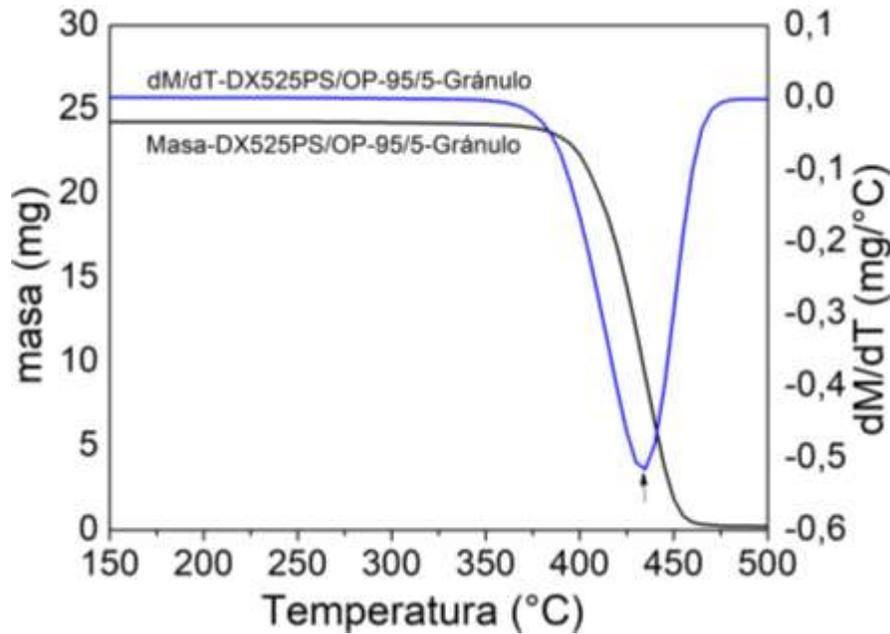


Figura 2- 11: Derivada de la termogravimetría del gránulo compuesto de PS/OP-95/5.

2.2. Manufactura de las muestras a evaluar.

En cuanto al análisis de manufactura se tienen dos procesos de estudio, los cuales son: la línea de extrusión y el moldeo de las probetas por compresión que se presentarán y desglosarán a continuación.

2.2.1. Parámetros de la línea de extrusión.

2.2.1.1. Sistema de control de la extrusora.

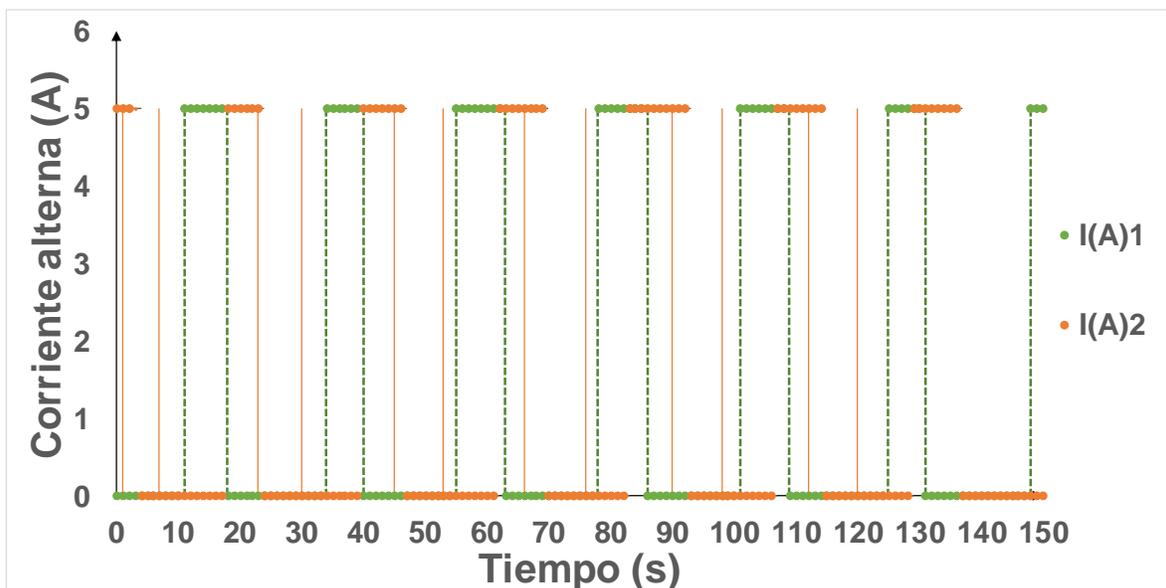
Al analizar el flujo del material al salir la extrusora, se controlaron las temperaturas de cada resistencia y la velocidad del giro del tornillo de extrusión. Por condiciones del sistema se contabilizaron 3 muestras que variaron entre 17,40 Hz hasta 29,50 Hz. Para las muestras de PS/OP: DX525-95/5 a 85/15, en la parte de las temperaturas seleccionadas en alimentación, mezcla, compresión y el dado de extrusión mostraron una tendencia de aumento, estabilidad y disminución de la temperatura respectivamente (J.E. Martín-Alfonso, 2014).

Tabla 2- 2: Elaboración de gránulos PS/OP

MUESTRA	Velocidad del giro (Hz)	R1(°C)	R2(°C)	R3(°C)
DX525-95/5	17,40	148/150	169/170	169/165
DX525-90/10	21,00	151/150	166/165	164/165
DX525-85/15	29,50	159/160	168/168	163/162
Promedio	22,63			

La temperatura de fusión de los polímeros en general es 50 °C por encima de la temperatura de transición vítrea, mostrando un intervalo de temperatura acorde con las temperaturas previamente estudiadas (**Figura 2- 12**). En cuanto a la corriente alterna de las resistencias fue controlada mediante un transformador, mostrando el cambio del amperaje con un comportamiento de escalón unitario en el cual varía entre 10 A y 7,5 A para la segunda y tercera resistencia respectivamente. La periodicidad de la señal expuesta se toma en un intervalo de tiempo de 120 segundos (2 minutos) (Domínguez, 2014).

Por parte de la extrusión de la muestra a una concentración de OP de 5%p/p se tiene que el escalón unitario para las dos resistencias puede variar de 0 a 5 A, que se mantiene en un intervalo de tiempo cercano a los 5 segundos para ambos escalones a los 5 A y con intervalos de tiempo en los valles cercanos a los 15 segundos para ambas resistencias (Eduardo, 2015).

**Figura 2- 12:** Sistema ON/OFF para los compuestos de PS/OP de 95/5

El primer escalón de la segunda resistencia empieza su variación hasta los primeros 15 segundos incrementando hasta los 7,5 A por 10 segundos, cayendo a 0 A por un periodo de 15 segundos, subiendo a los 7,5 A por 10 segundos donde la duración de los 7,5 A es de 10 segundos, seguido de cambios intercalados de 15 segundos y 10 segundos a 0 A. La tercera resistencia fue la mayor registrada (**Figura 2- 13**), con una diferencia de 30 segundos, descendiendo a 0 A por 15 segundos al igual que los 10,0 A. Posterior a este intervalo la corriente se incrementa tan solo 5 segundos a 10,0 A por 15 segundos, bajando a 0 A durante 10 segundos (Jimenez, 2012).

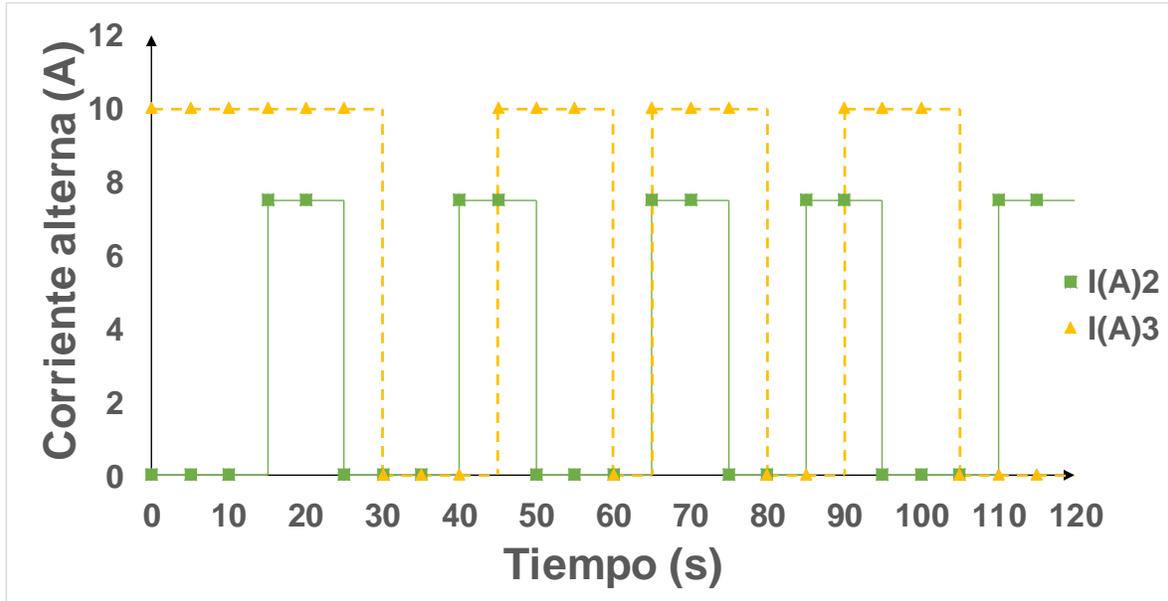


Figura 2- 13: Sistema ON/OFF para los compuestos de PS/OP de 90/10

Por parte de la extrusión de las muestras con una concentración de OP de 15 %p/p se observa que el escalón unitario producido por la corriente alterna de la primera resistencia se encuentra en un intervalo entre 0 y 5 A. Este sistema ON/OFF, se realizó mediante un intervalo de tiempo de 160 segundos, en el cual la duración del evento de apagado comienza con 30 segundos, donde posteriormente hay un encendido con un valor de hasta 5 A durante 5 segundos (Fandiño, 2014).

Posterior a esto se observa que el intervalo encendido se prende y apaga cada 10 segundos. En cuanto a la variación del apagado en su mayoría se mantiene en el mismo intervalo que en el momento del encendido (**Figura 2- 14**) a diferencia de los 35, 80 y 125 segundos. Por otro lado, se tiene que la segunda resistencia varía entre 0 A a 7,5 A; donde la mayoría de los encendidos se encuentran en un intervalo de 10 segundos, sin embargo, la variación del apagado no se mantiene constante puesto que varía entre 5 segundos y 15 segundos (Rojas-Molina A, 2012).

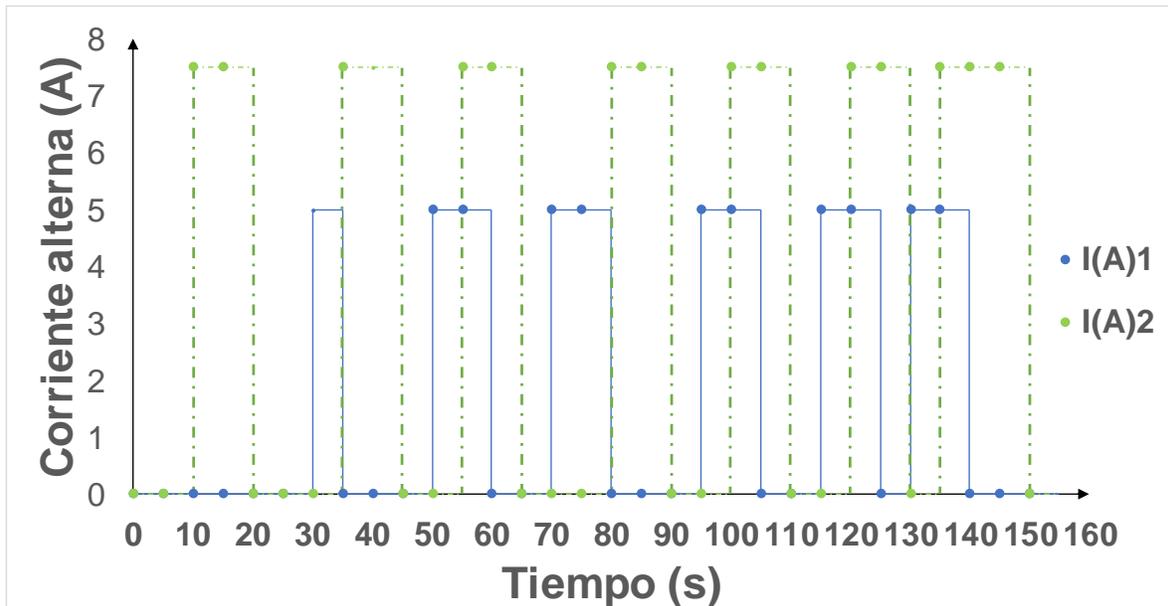


Figura 2- 14: Sistema ON/OFF para los compuestos de PS/OP de 85/15

En el proceso de extrusión el encendido y apagado de las extrusoras varían siempre 2 de 3 permitiendo una distribución de temperatura alrededor del barril y el dado dependiendo principalmente de la temperatura previamente programada.

2.2.1.2. Termografías del sistema de extrusión.

La distribución de la temperatura alrededor de todos los segmentos del proceso se realizó mediante una cámara de infrarrojo marca FLIR, en los elementos como la tolva, el barril y sus tres zonas, los dados, el material extruido y la canaleta de enfriamiento. Las temperaturas más altas entre las zonas analizadas, variaron desde 57,2 °C a 210°C. El cabezal de extrusión muestra una temperatura de 184,1

°C transportándose a través de la compuerta del granulador (**Figura 2- 15** f). (Moya, 2017).

La temperatura en la conexión con el barril es de 172,1°C, decreciendo su temperatura circundante (**Figura 2- 15** a-f). La zona de compresión está influenciada por las resistencias, generando dos bandas a una temperatura de 210,6 °C. En la zona de fusión, la temperatura se distribuye predominantemente en la parte inferior del barril alcanzando 199,5 °C. En la zona de transporte, la temperatura llega a 146,6 °C, menor a las anteriores, al ser programada con menor temperatura y también el material en estado granular. Por último, tenemos la zona de alimentación, compuesta por la tolva, la cual muestra un decrecimiento radial de la temperatura desde 57,2 °C hacia el motor y la tolva.

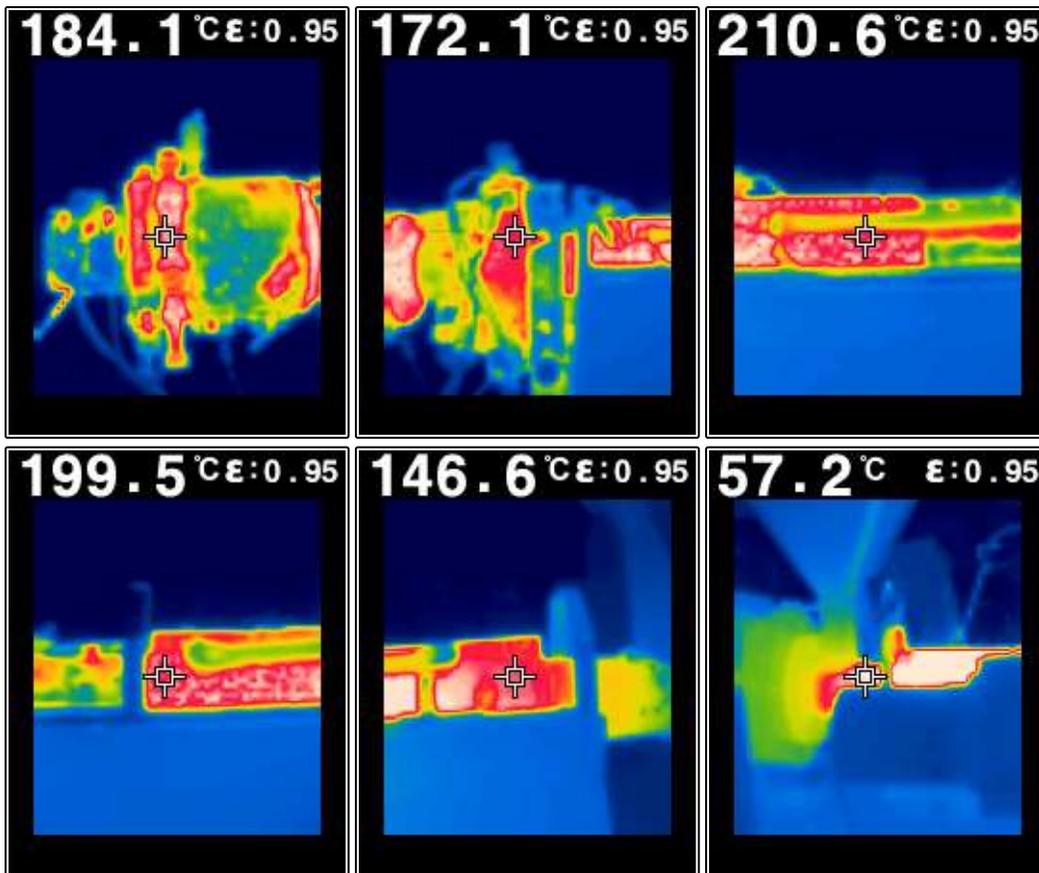


Figura 2- 15: Termofotografías de varios segmentos de la extrusora (de izquierda a derecha): **a)** el cabezal de extrusión, **b)** la conexión con el barril, **c)** zona de compresión, **d)** zona de fusión, **e)** zona de transporte y **f)** zona de alimentación.

Cambiando 90° la dirección de la toma de la imagen se observa el punto de medición (**Figura 2- 16) a**), marcando un valor de 199,0 °C. La distribución frontal percibida tuvo una preferencia de transporte, hacia los tornillos de calibración. Hay un leve transporte en la sección del elemento de inyección de aire, el cual presenta un menor crecimiento. Posteriormente, la siguiente imagen muestra el comportamiento de sus isotermas las cuales se distribuyen desde el centro del cabezal de extrusión de película, discontinuamente hasta el dado de granulado (**Figura 2- 16) a**). El punto de medición en esta parte, se realiza sobre el filamento extruido, el cual claramente, se ve el comportamiento de enfriamiento en función de la longitud del filamento, mostrando disminución a lo largo del mismo (Darshan Ravoori, 2019).

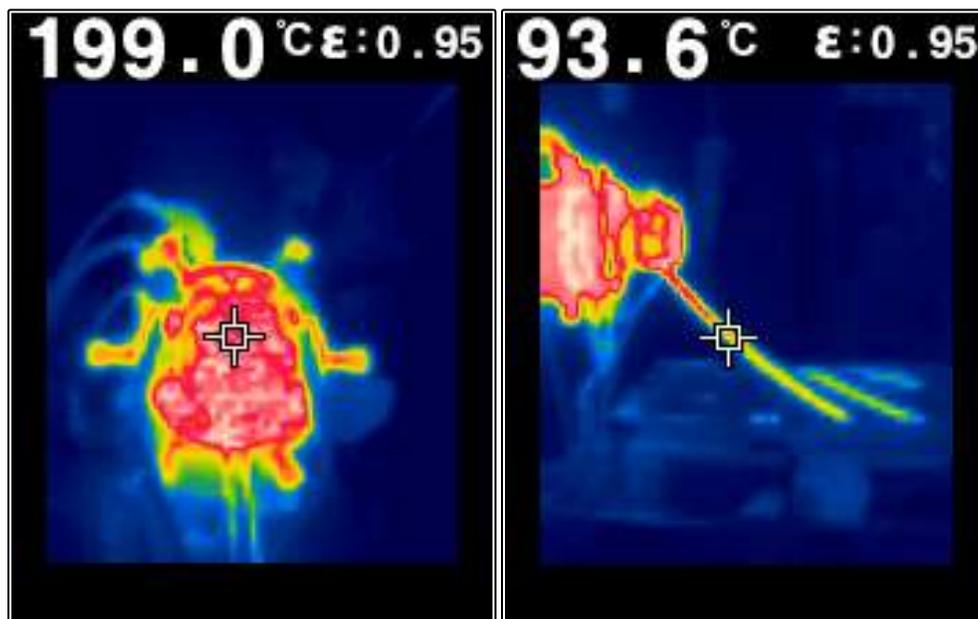


Figura 2- 16: Termofotografías frontal y lateral del polímero fundido.

2.2.1.3. Análisis de flujo de los compuestos.

Al analizar el flujo másico de muestras de PS plastificado con diferentes concentraciones de OP, y tomando los valores del índice de fluidez por cada material, se observa que los compuestos fabricados con la referencia Styron 675 con un índice de fluidez (IF) de 12g/10 min, aumentan su flujo de 24,63 g/min con

una concentración de OP de 5 %p/p, incrementando la fluidez hasta 28,30 g/min con 10 %p/p de OP (Fabio Previdia, 2006).

La referencia DEXTON 525 posee un índice de fluidez menor, lo que hace que este PS tenga flujo limitado, similar a la pasada referencia se tiene que el PS con un porcentaje de 10 %p/p de OP transportando una masa a 6,2 g/min, En cuanto a la referencia de PS 535, es el que posee el menor índice de fluidez de 4 g/L, donde se puede identificar un comportamiento singular (**Figura 2- 17**), a los 5 %p/p de OP, el flujo másico de dicha referencia fue de 7,64 g/min, decreciendo al aumentar la cantidad de aceite a una taza de 5,59 g/min, sin embargo al llegar a los 15 %p/p de OP el aumento en el flujo másico llego hasta los 12,56 g/min (Meissner, 1983).

Por condiciones del procesamiento y las discontinuidades que presentó la extrusora, no se pudieron realizar las demás muestras, sin embargo, se puede analizar el comportamiento hidrodinámico del polímero fundido y su procesamiento.

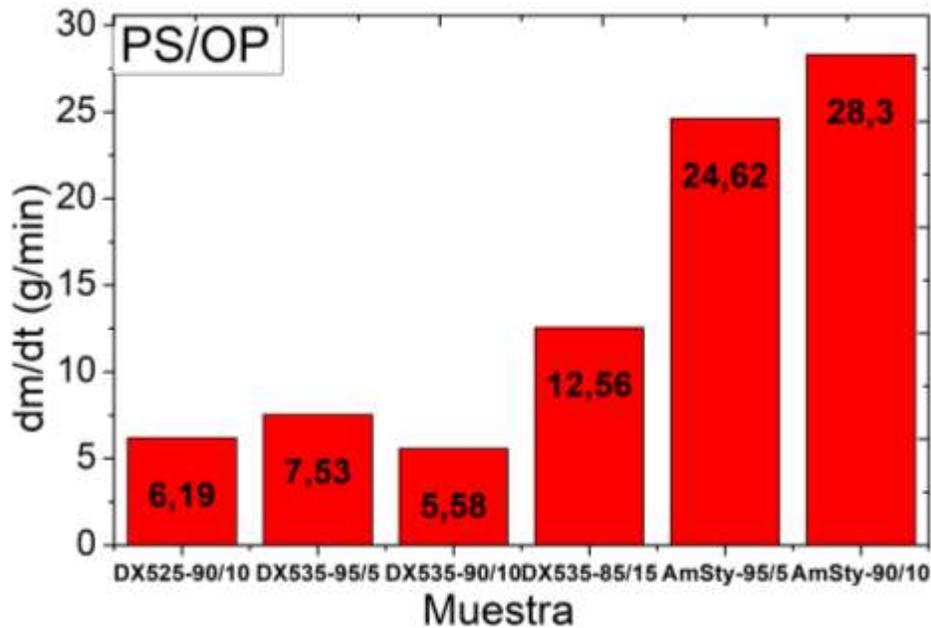


Figura 2- 17: Flujo másico de los compuestos PS/OP a través del dado de extrusión.

2.2.2. Parámetros del prensado de probetas.

2.2.2.1. Cambios de temperatura y presión de las muestras.

Se concentrará en los cambios de presión y temperatura en el moldeo de probetas ASTM 638D tipo 1, a través de una serie de gránulos en diferentes condiciones.

La muestra de PS se evidenció que el cambio en la temperatura de calentamiento, inició a 140 °C, donde pasados 1,5 h la temperatura llegó a 170 °C, comportamiento similar para la presión, la cual transitó de 160 kg/m² luego de una hora y media hasta 190 kg/m². Posterior al moldeo por compresión las probetas se dejaron enfriar durante una presión constante hasta ser desmoldadas (**Figura 2- 18**), disminuyendo las burbujas de aire. Las probetas fabricadas con el PS Styron 675 no contienen en su matriz de oleína de palma (Rong Guan, 2006).

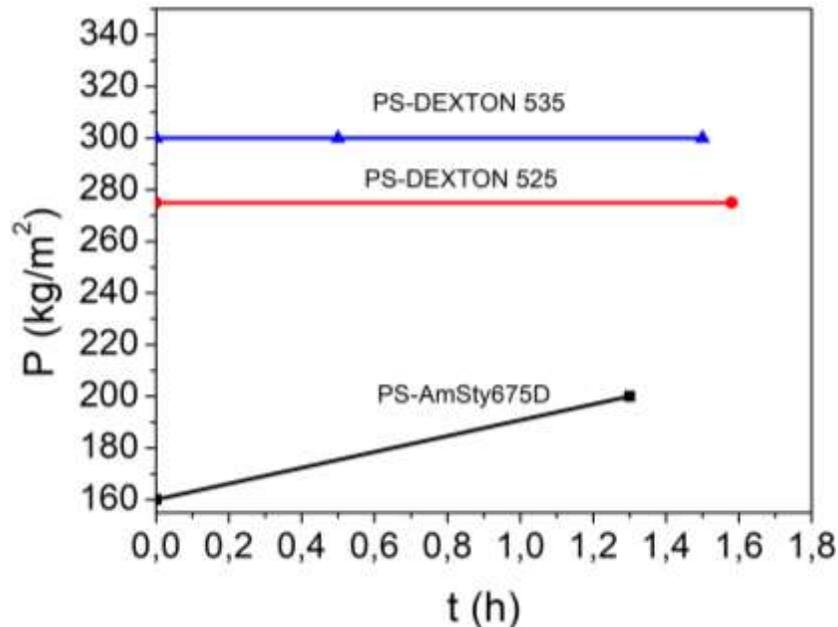


Figura 2- 18: Variación de la presión del moldeo por compresión para diferentes referencias de PS.

Ya para las muestras de PS de la referencia DEXTON 535 (**Figura 2- 19**), se tiene que el comportamiento de la temperatura varía de una forma ascendente de 25 °C hasta 200 °C durante un largo periodo de 2,5 h, donde después de este intervalo de tiempo, la temperatura empieza a decrecer hasta llegar a un valor de 25 °C nuevamente, en un periodo mucho menor de 1 h (Junsong Li, 2019).

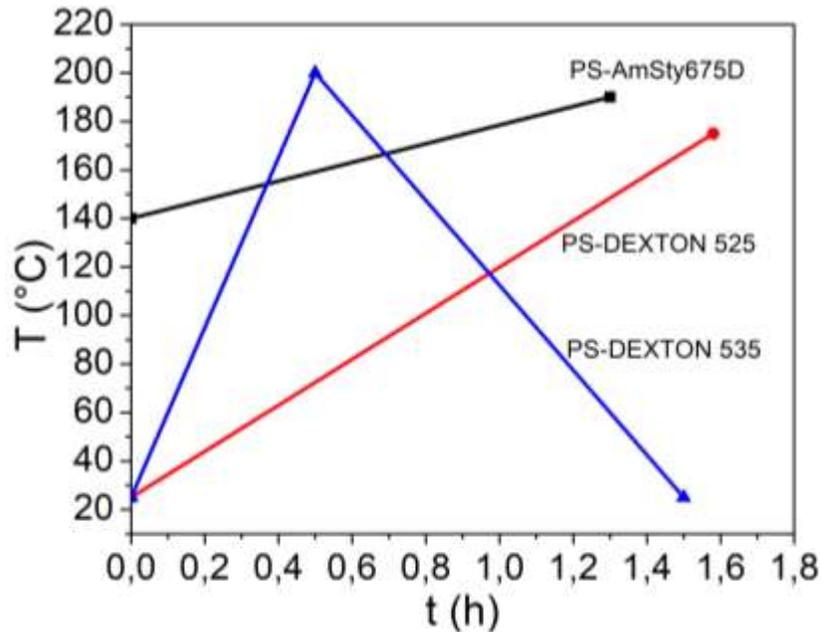


Figura 2- 19: Variación de la temperatura del moldeo por compresión para diferentes PS

En cuanto al comportamiento de la presión de la prensa de moldeo, esta se manifiesta constante a una presión de 300 kg/m^2 durante un periodo de tiempo de 3,5 h. Al tener un índice de fluidez (IF) de 4 g/10 min , se entiende que el peso molecular de esta referencia de PS, son mayores que las anteriormente analizadas, mostrando características de resistencia a la temperatura y a la presión, particulares, debido a que las longitudes de cada cadena polimérica requieren de mayor tiempo de relajación para su reptación al pasar del estado vídrioso al estado fundido, diferenciándose de los anteriores (Takumi Sako, 2019).

Los cambios de la temperatura de moldeo se realizan en el PS referencia DEXTON 525, con el cual se moldearon los gránulos, por medio de fusión, a diferentes composiciones de OP. Se observa que el ciclo de calentamiento del PS sin contenido de OP pasa de una temperatura de 25 °C hasta 175 °C cerca a la hora y media de calentamiento (**Figura 2- 20**), seguido de una concentración de 5 % de OP el cual tiene un comportamiento creciente que comienza en los 165 °C , donde al pasar 1,18 h llega a una temperatura de 190 °C , pasados algunos minutos hasta las 1,5 horas, se mantiene constante la temperatura (Tatara, 2017).

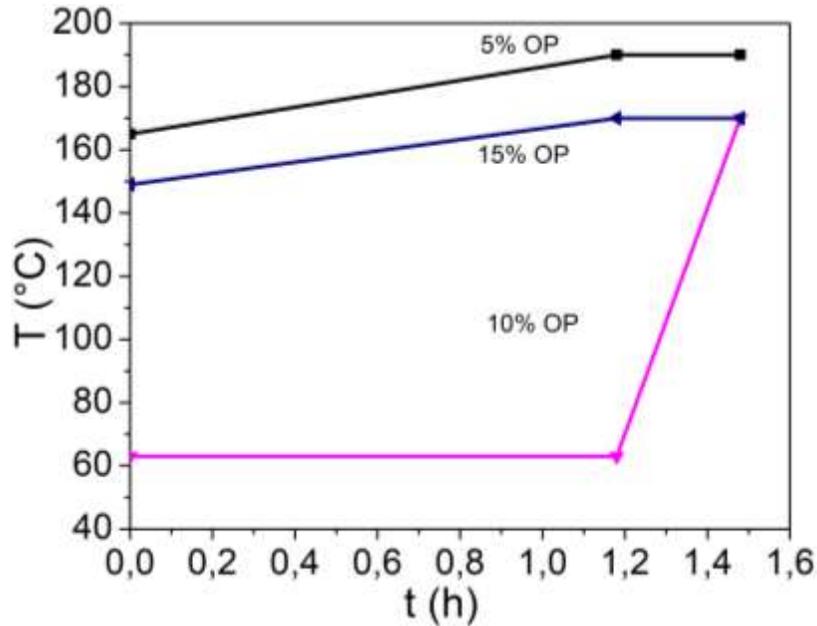


Figura 2- 20: Variación de la temperatura del moldeo por compresión para diferentes compuestos de PS/OP.

En el caso de la concentración de 10 %p/p en OP se observó que la primera media hora se mantuvo en 60 °C, creciendo hasta llegar a una temperatura de 170 °C manteniéndose solo 5 segundos. La variación de la temperatura para la probeta de 15 %p/p de contenido de OP, paso de estar en 149 °C hasta llegar a los 170 °C manteniéndose constante menos de un minuto, cayendo así hasta los 100 °C en 30 minutos (M. Revellino, 2000).

Cambiando de variable (**Figura 2- 21**) tenemos la presión ejercida por la prensa, la cual fluctúa aumentando la concentración de OP en la matriz. Para la primera curva, se tuvo un porcentaje de 0 %p/p de OP, la presión se mantiene constante en 275 kg/m² durante más de una hora y media. Con respecto a la curva de compresión, para una composición de OP de 5%p/p, mostró un crecimiento desde 150 kg/m² durante 1,18 h hasta llegar a los 375 kg/m² incrementado 0,30 min hasta 380 kg/m² (Wei Liu, 2019).

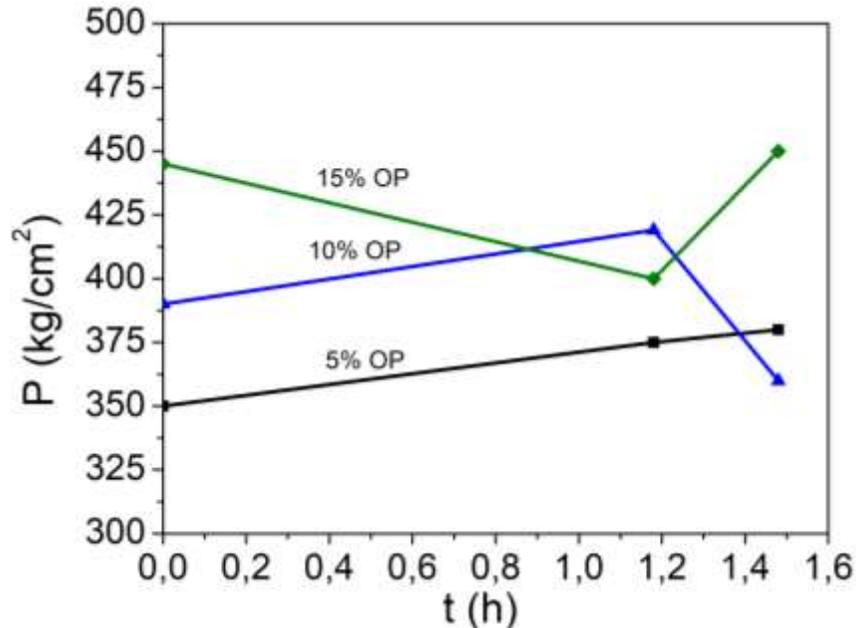


Figura 2- 21: Variación de la presión del moldeo por compresión para diferentes compuestos de PS/OP.

El moldeo de las probetas con un porcentaje de 10 %p/p de OP tiene una variación, diferenciada a comparación de las demás, puesto que su presión de arranque comienza a los 390 kg/m² incrementando la primera media hora llegando a 419 kg/m², la cual se redujo hasta una presión de 360 kg/m² pasada la siguiente media hora, incrementando rápidamente a 417 kg/m². Se observó que este comportamiento, transcurrió en un intervalo de tiempo mucho menor que las demás isóbaras (C.H.Park, 2012).

La muestra con OP a 15 %p/p tubo una tendencia negativa empezando desde una presión de 445 kg/m² bajando durante un frecuencia de tiempo de 1,25 h hasta 400 kg/m², posterior a este cambio rápidamente sube a 450 kg/m² tan solo en 0,01 h, mostrando al pasar de media hora bajó levemente a 420 kg/m². A diferencia del comportamiento anteriormente analizado este tiene un intervalo mayor en el tiempo (Emiliano M. Ciannamea, 2014).

2.2.2.2. Termografías del sistema de compresión.

En cuanto a los campos de temperatura y su transporte a través de la prensa de moldeo, se puede observar en la primera imagen que la temperatura en la placa superior asciende a los 163,1 °C, con una distribución de disminución radial, con predominancia hacia la parte izquierda de la placa. Similar, la placa inferior muestra una distribución de temperatura en dos regiones (**Figura 2- 22**), concentrándose principalmente en la parte derecha y muy leve en la izquierda Vamsi Krishna Balla et al., 2019 que muestra como los parámetros de moldeo y temperatura, direccionen el flujo de diferentes polímeros cargados con fibras naturales.

Ya observando a una posición de 90 °, el punto de medición sobre la placa inferior posee una temperatura de 142,5 °C, cabe anotar que el área de la región comprendida por la placa superior es mayor que la inferior, sin embargo, la distribución a través de la placa es discontinua arriba, y continua en la parte inferior. En la parte fronteriza entre las regiones de la placa se ve que los soportes no adquieren la temperatura efectivamente de la placa, mostrando una tonalidad amarilla (Carmen M. González-Henríquez, 2019).

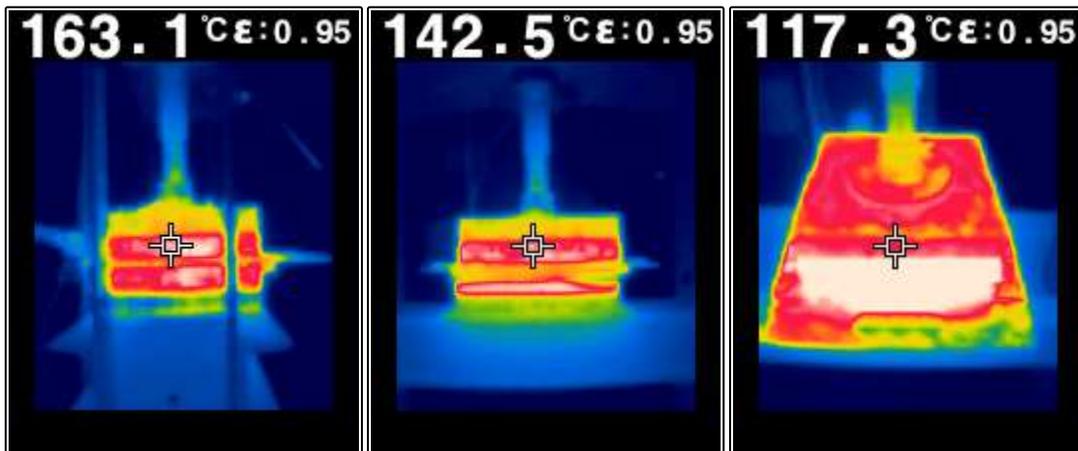


Figura 2- 22: Termofotografías del moldeo por compresión.

Dando un giro de alrededor de 45 ° hacia la parte superior de la prensa, se observa que la temperatura medida sobre la placa superior del sistema, muestra una temperatura de 117,3 °C, donde hay una mayor temperatura en la parte frontal en

contacto con el molde, cabe anotar que hay una tendencia de enfriamiento en la parte inferior de la prensa (G. Ji, 2015).

2.3. Comportamiento mecánico de los compuestos PS/OP

2.3.1. Esfuerzo y deformación para las mezclas PS/OP.

El esfuerzo máximo de las muestras de PS varió entre las tres referencias utilizadas, cercanas a los 30 MPa (**Figura 2- 23**), similar a la hallado por L. Rios-Guerrero et al., 2000 con el poliestireno de alto impacto cargado con policloropreno (Solpreno como nombre comercial) el cual alcanzó un esfuerzo de 32,9 MPa. Al aumentar el contenido de %OP el esfuerzo máximo reduce levemente pasando de 30,03 MPa con 0 %p/p de OP hasta 22,84 MPa con 15 %p/p de OP, estudios similares encontraron una reducción en el esfuerzo último al aumentar la concentración del ion tosilato en la matriz de termo plástico de poliuretano (TPS), se reduce el esfuerzo último entre 6,54 MPa a 4,32 MPa, pasando de una concentración del plastificante de 3 %p/p a 10 %p/p (Pauline May Losaria, 2019).

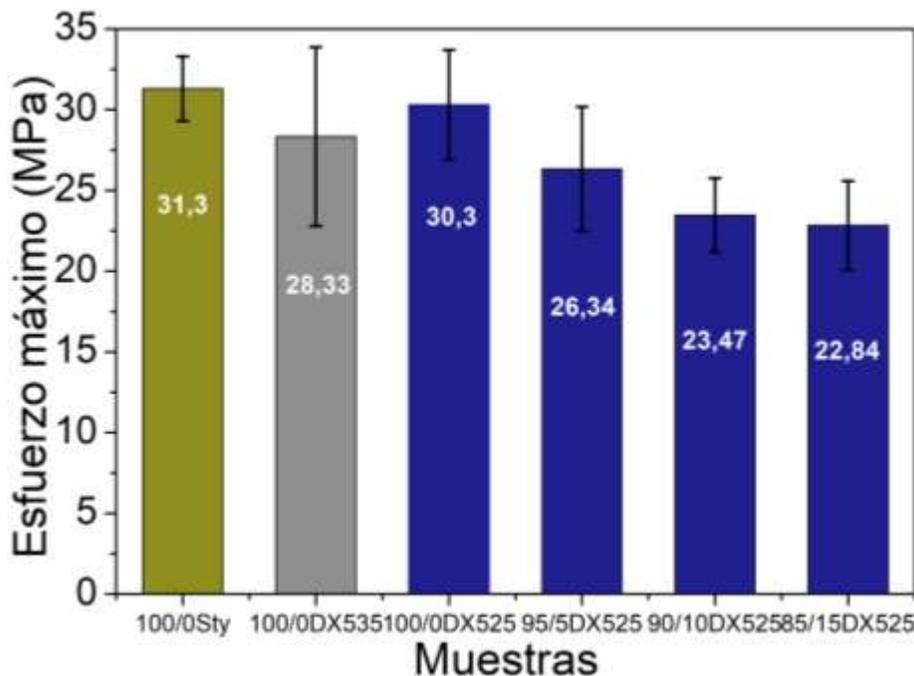


Figura 2- 23: Comportamiento de esfuerzo máximo de diferentes referencias de PS y concentraciones de OP en el PS DEXTON 525.

La deformación máxima mostrada en la **Figura 2- 24** de las muestras de PS de las tres referencias utilizadas en el presente estudio, característica de los materiales vidriosos, debido a su mínima deformación. En cuanto a la deformación de las muestras de PS DEXTON 525 se tiene una reducción con forme aumenta el contenido de OP', similar al estudio hecho por Brüster et al., 2016 que analiza el comportamiento mecánico de ácido poliláctico PLA plastificado con polietilenglicol acrilato, costeando una reducción sustantiva de la deformación al aumentar la concentración de la acri-PEG.

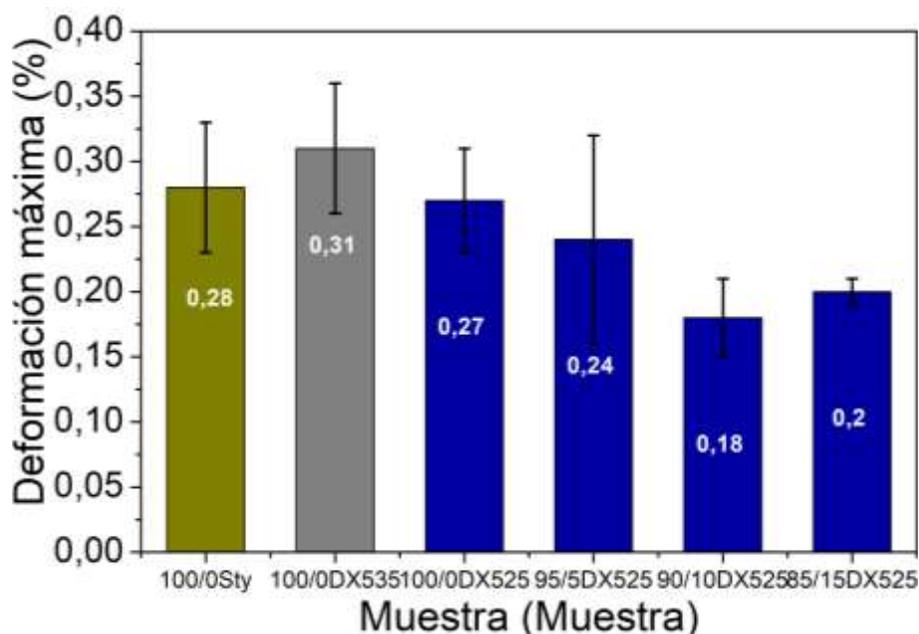


Figura 2- 24: Comportamiento de la deformación máxima de diferentes referencias de PS y concentraciones de OP en el PS DEXTON 525.

En general el comportamiento mecánico del poliestireno mostro una tendencia elástica. Sin embargo, al aumentar la concentración de OP, mostro una tendencia de deformación plástica al final de la curva, mostrando como se vio anteriormente una leve plastificación la cual se ve reflejada en el aumento de la pendiente

2.3.2. Relación del módulo de Young con él porcentaje de OP

La (**Figura 2- 25**) a continuación muestra el comportamiento de crecimiento del módulo de Young al incrementar el porcentaje de OP %p/p en la matriz polimérica.

El punto de inflexión se encuentra a una concentración de OP de 8,1615 %p/p y el módulo más alto se encuentra a un porcentaje de 15 %p/p de OP, con un valor de 1,104 GPa.

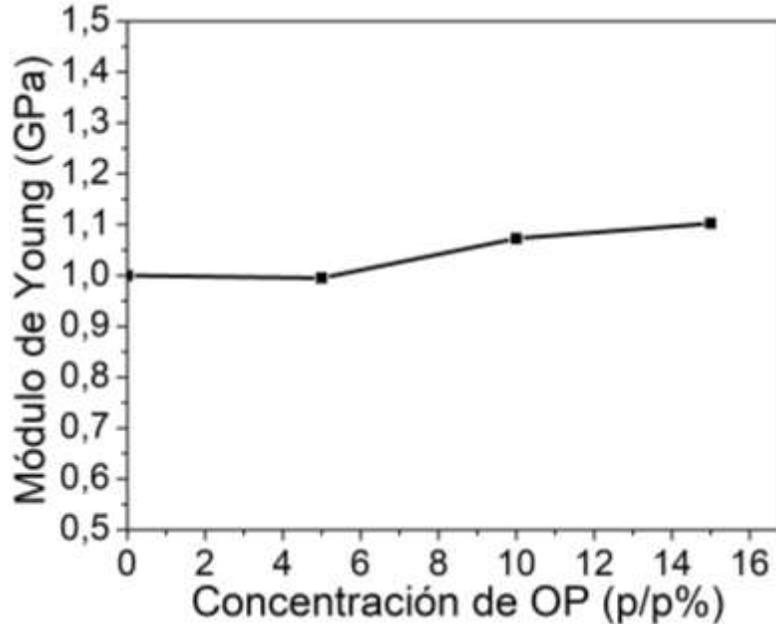


Figura 2- 25: Módulo de Young con respecto al porcentaje de OP.

2.4. Estudio morfológico de los compuestos poliméricos PS/OP.

La morfología de las muestras fue analizada por SEM, las micrografías de las superficies fracturadas del gránulo (**Figura 2- 26**) con un contenido de 15 %p/p de OP se puede observar que la superficie de fractura, presenta una morfología escarpada, dentro de la forma cilíndrica del gránulo, con una escala de 500 μm y un campo visible de 2,1 mm. Para la imagen subsecuente se identifica en el plano formas irregulares alargadas, No porosa y de piel continúa descritas por (Gutiérrez, 2014) .

Ya en la sección **b)** de la imagen se observa menor cantidad de estas formas alargadas sin orientación paralela. Lo anterior se puede atribuir a la concentración de esfuerzos que se observaron en la parte izquierda en el momento de la ruptura del gránulo analizado. Esta imagen tiene un mayor aumento, dicha imagen posee una escala 10 veces mayor, llegando a los 50 μm y un campo visible de 208 μm .

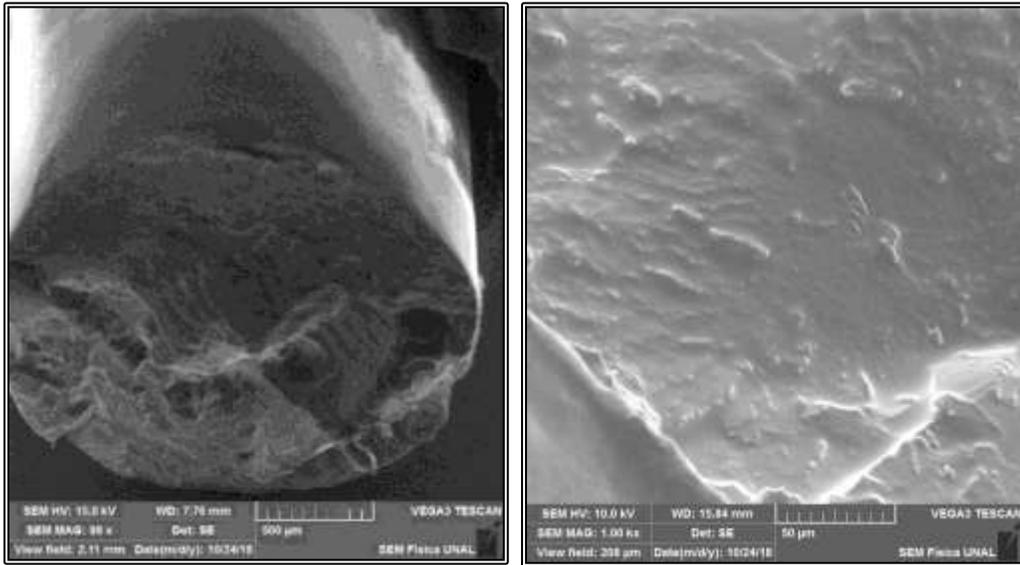


Figura 2- 26:Microscopía del compuesto PS/OP-85/15 a) 500 μm y b) 5 μm .

En las siguientes imágenes (**Figura 2- 27**) el compuesto de PS/OP- 85/15 exhibe varias cavidades esféricas donde el aceite se encuentra localizado e inmobilizado. Estas cavidades son regularmente distribuidas a través de la matriz del PS. Al detenerse sobre la imagen se denotan cavidades que se encuentran cubiertas y descubiertas, donde las descubiertas se pueden ubicar en la sección central de la imagen en dos secciones y una más pequeña en la parte superior derecha de la imagen. Esta imagen se encuentra mucho más cerca con una escala de 10 μm y un campo de visibilidad de 41,5 μm .

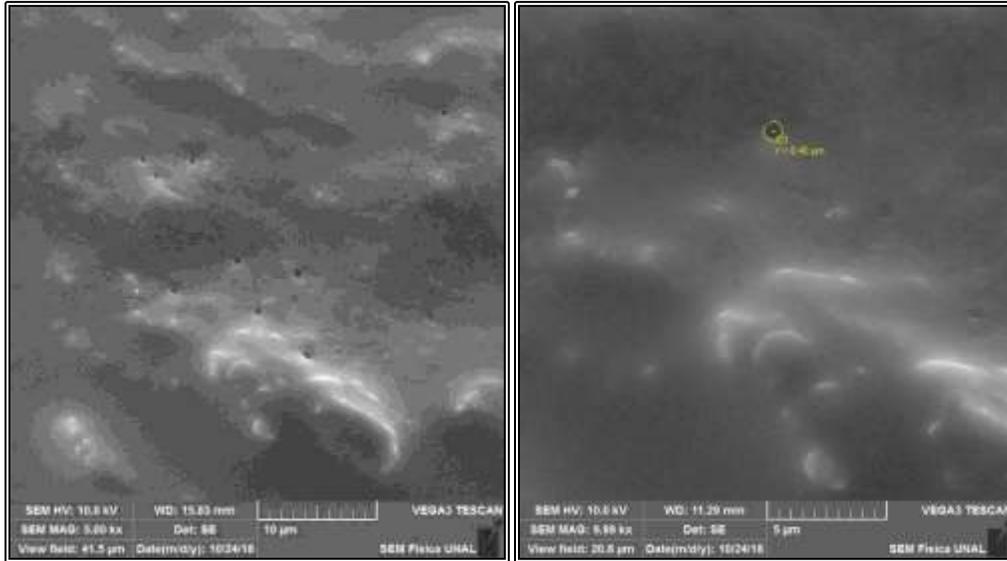


Figura 2- 27:Microscopía del compuesto PS/OP-85/15 a) 10 μm y b) 5 μm

Ya para la última imagen se logra medir el diámetro de una de las cavidades esféricas dispersadas, alcanzando un valor de 0,80 μm , la cual se encuentra dentro de la superficie irregular abrupta. Se puede concluir que las propiedades de la oleína no fueron modificadas y consecuentemente como se observa para el PS, estas podrían protegerlo de daños causados por la exposición a la luz solar y el oxígeno atmosférico. Esta fue la imagen de mayor aumento, alcanzando una escala de 5 μm y un campo de observación de 20,8 μm .

3. Conclusiones y recomendaciones.

3.1. Conclusiones.

Se concluye para intervalo de concentraciones del grupo 3 que la OP tiene fases que se encuentran más cercanas a comparación de las proporciones de OP anteriores, porque después de 75 %p/p de OP, tiende nuevamente a ser una sola fase. En lo que respecta a los ciclos de calentamiento se especifican los cambios energéticos previos a la primera fase, mostrando una mayor fluctuación para el segundo ciclo de calentamiento. Dichas composiciones definen el incremento de los cambios energéticos para la fase dura, promoviendo la solubilidad en el compuesto. Por parte de la fase blanda la variación energética se mantiene constante en el intervalo de composiciones de OP mencionado.

Finalmente, las mezclas con una alta composición de OP se identificaron plenamente en el cambio de fase de líquido a sólido, puntualmente en el segundo ciclo de calentamiento. Similar al anterior un grupo de compuestos experimentales efectuados mostraron cercanía entre las T_g de ambas fases, tanto la dura y la blanda, concluyendo la tendencia a la desaparición de la fase dura al predominar el contenido de OP.

Los resultados obtenidos para los gránulos de PS se pueden concluir que los ciclos de calentamiento mostraron valores cercanos para el cambio de fase del estado vítreo al estado plástico, mostrando concordancia con las mezclas obtenidas por el método solvent casting, calculando la T_g de los compuestos analizados.

La dependencia de la T_g en función de la composición de OP en la matriz polimérica reveló importantes hallazgos en donde se puede concluir los máximos locales mostraron variaciones significativas para la fase blanda en un porcentaje de OP bajo, y dos máximos locales para la fase dura en altos porcentajes de OP, lo que indicando una óptima estabilidad del compuesto en el intervalo entre 20 %p/p a 40 % p/p de OP.

Es de gran interés en el estudio conocer las temperaturas de degradación anteriormente mostradas, de estas se puede concluir que la resistencia térmica de la OP y el compuesto PS/OP son acordes con la aplicabilidad de la producción del compuesto. Con ello al verificar la formulación y la estabilidad a esta concentración se podría aplicar plenamente el plastificante a resinas de PS.

Al comparar la T_g teórica planteada por el modelo de Fox con el comportamiento real de las fases, se encontró su trayectoria por la región comprendida entre las dos fronteras, de la fase blanda y la fase dura, facilitando la temperatura de procesamiento del material para diferentes concentraciones de OP.

Se puede concluir, que el efecto plastificante de la OP sobre el PS, tubo influencia en la lubricación del husillo de la extrusora, reduciendo el escalón unitario a periodos y voltajes menores al aumentar la concentración de oleína de palma, lo que facilito la aceleración angular y la disminución de las temperaturas de fusión.

El flujo másico evaluado en el proceso de extrusión, se produjo de manera discontinua, presentando diferencias entre los compuestos analizados, concluyendo así, que el índice de fluidez, influye plenamente en las propiedades hidrodinámicas del polímero que, al ser plastificado, mejora su movilidad mediante fenómenos de lubricación, tanto intermolecularmente como en las fronteras entre las hélices, el barril, el núcleo y el compuesto polimérico fundido.

El moldeo por compresión de las probetas, mostraron diferencias significativas tanto en la oscilación de temperatura y en la presión del sistema respectivamente. Con ello se puede afirmar que la influencia de la concentración de la OP en los parámetros de moldeo incrementa la variación de dichos parámetros. Sin embargo, los tiempos de calentamiento y presión aplicados no varían significativamente.

Los campos de temperatura que se observan en la prensa garantizan la visualización del cubrimiento completo de las placas inferior y superior hacia molde, con lo que se puede concluir que el moldeo de material resulte ser homogéneo, previniendo la aparición de burbujas en el interior de la probeta, las cuales pueden

debilitar la estructura. Pese a que las regiones discontinuas de la temperatura hacen que la distribución en las probetas resulte ser demoradas mayores a 1h.

En cuanto a las propiedades mecánicas de los materiales evaluados concluye que, todos los compuestos analizados tienen un comportamiento elástico, donde se puede verificar que la región vítrea se encuentra a una temperatura por encima de la temperatura ambiente. No obstante, las variaciones son significativas al comparar la deformación, que, si bien los materiales presentan fragilidad, los cambios en el alargamiento son significativos, facilitando la acumulación de energía.

Se puede concluir que la OP tiene influencia sobre la fragilidad de las muestras de PS/OP, al distribuirse en dos fases, las cuales son refutadas por medio de las microscopias SEM, evidenciado su conformación dentro de la matriz del PS en forma de cavidades esféricas, las cuales facilitan las fallas internas incrementando la vidriosidad del material.

3.2. Recomendaciones.

En el transcurso del presente estudio faltaron ciertos procedimientos los cuales se recomendarán para trabajos posteriores o en el presente trabajo, dichas se recomendaciones se listarán de la siguiente manera:

- Preparar mezclas de PS referencias DEXTON 525 y 535 mediante la técnica solvent casting, en el mismo rango de concentraciones del presente estudio con el fin de realizar sus respectivas calorimetrías y comparar con las propiedades termodinámicas expuestas anteriormente, de manera que varíen la OP de 0 %p/p a 80 %p/p.
- En cuanto a la calorimetría de la OP se recomienda ampliar el rango hasta 340 °C, para observar cambios de fase antes de su degradación, debido a que los métodos que se plantearon tan solo llegaban por debajo de la temperatura de fusión.
- Intentar realizar inversiones o alianzas estratégicas para realizar ensayos de extrusión con extrusoras que posean sistema de aditivado líquido.

- Realizar mediciones de flexión en 3 y 4 puntos de ensayos de impacto Izod en las muestras de PS vírgenes en las 3 referencias, MOE-E y MOE-P.
- Medir la viscosidad mediante el esfuerzo cortante con el fin de evaluar el comportamiento visco elástico de las muestras de PS virgen, MOE-E y MOE-P, esto con el fin de determinar de manera clara la fabricación del material como alternativa a el eucalipto.

Bibliografía

- Abbott, S. (30 de 05 de 2021). <https://www.stevenabbott.co.uk/>. Obtenido de <https://www.stevenabbott.co.uk/practical-solubility/polymer-fox-equation.php>
- Airton Germano Bispo-Jr, N. A. (2018). Red-light-emitting polymer composite based on PVDF membranes and Europium phosphor using Buriti Oil as plasticizer. *Materials Chemistry and Physics*, 160-167.
- Alejandra Agudelo Agudelo, A. C. (2017). *Re-diseño de un proceso que permita el reciclaje del poliestireno expandido EPS*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana.
- Altan, M. (2017). Thermoplastic Foams: Processing, Manufacturing, and Characterization. *Recent Research in Polymerization*.
- ASTM. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics1 D638 – 14. *ASTM International*, 1-15.
- Avila, J. N. (2013). *Nanopartículas de poliestireno como carreadores de surfactante para recuperação avanzada de petróleo*. Rio De Janeiro: Universidade Federal Do Rio De Janeiro.
- Brüster, B. (2016). Thermo-mechanical degradation of plasticized poly(lactide) after multiple reprocessing to simulate recycling: Multi-scale analysis and underlying mechanisms. *Polymer Degradation and Stability*, 132-144.
- Buong Woei Chieng, N. A. (2014). Epoxidized Vegetable Oils Plasticized Poly(lactic acid) Biocomposites: Mechanical, Thermal and Morphology Properties. *molecules*, 6024-16038.
- C.H.Park, W. (2012). 3 - Compression molding in polymer matrix composites. En *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* (págs. 47-94). Cambridge: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.
- Carmen M. González-Henríquez, M. A.-V.-H. (2019). Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 94 , 57–116.
- Cedron, J. C. (2014). Alálisis de biodiesel preparado a partir de residuoas de aceite doméstico, mediante RMN. . *Sociedad Química del Perú* ,, 4-5.
- Daniela Schlemmer, E. R. (2007). Polystyrene/thermoplastic starch blends with different plasticizers Preparation and thermal characterization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 635–638.
- Daniele de A. Miranda, G. F.-S. (2016). Are we eating plastic-ingesting fish? *Marine Pollution Bulletin*, 103, 109–114.

- Darshan Ravoori, C. L. (2019). Experimental and theoretical investigation of heat transfer in platform bed during polymer extrusion based additive manufacturing. *Polymer Testing*, 73, 439–446.
- Deepalekshmi Ponnamma et al. (2018). Carbon Nanotube Tube Filled Polymer Nanocomposites and Their Applications in Tissue Engineering. En Sneha Mohan Bhagyaraj et al., *Front Matter* (págs. i-iii). Kottayam: Applications of Nanomaterials.
- Dehaut, A. (2016). (2016). Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization. . *Environmental Pollution*, 223-233.
- Diosdado de la Peña José Angel, P. M. (2011). Un nuevo método para producir probetas de poliestireno en laboratorio. . *Memorias del XVII Congreso Internacional Anual de La Somim.*, 861-869.
- Domínguez, L. F. (2014). *automatización de una extrusora monohusillo para trabajar materiales plásticos y compuestos*. Cali: Universidad Autónoma De Occidente- Facultad De Ingeniería.
- Dominik Brecht, F. U. (2019). Thermogravimetry coupled to an atmospheric pressure photo ionization quadrupole mass spectrometry for the product control of pharmaceutical formulations and the analysis of plasticizers in polymers. *Talanta* , 198 , 440–446.
- Eduardo, N. I. (2015). *Diseño y construcción de una máquina elaboradora de hilo PET*. Quito: Universidad Internacional Del Ecuador .
- Emiliano M. Ciannamea, P. M. (2014). Physical and mechanical properties of compression molded and solution casting soybean protein concentrate based films. *Food Hydrocolloids* , 38, 193-204.
- Fabiania, C. (2020). Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment. *Journal of Energy Storage*, 101-129.
- Fabio Previdia, S. M. (2006). Design of a feedback control system for real-time control of flow in a single-screw extruder. *Control Engineering Practice* , 14, 1111–1121.
- Fandiño, J. S. (2014). *CHARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE ACIDO POLILÁCTICO (PLA) CON REFUERZOS DE FIBRA DE CABECINEGRO (MANICARIA SACCIFERA) A ALTAS TASAS DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN EL BANCO DE PRUEBAS DE BARRA DIVIDIDA DE HOPKINSON*. Bogotá D.C.: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.
- Fazli Wahid et al. (2018). Nanocomposite scaffolds for tissue engineering; properties, preparation and applications. En A. M. Asiri, *Applications of Nanocomposite Materials in Drug Delivery* (págs. 701-735). Abbottabad: Woodhead Publishing Series in Biomaterials.
- G. Ji, P. Z. (2015). Shape memory polymer-based self-healing composites. En *Recent Advances in Smart Self-healing Polymers and Composites* (págs. 293-363). Baton Rouge: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.

- García, N. (2019). *Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de un plan de gestión posconsumo de poliestireno expandido (EPS) utilizado en el envase de alimentos en Colombia*. Bogotá: Universidad EAN.
- Guido Grause, D. K. (2013). Impact of brominated flame retardants on the thermal degradation of high-impact polystyrene. *Polymer Degradation and Stability*, 98, 306-315.
- Guodong Liu, Y. Z. (2014). Study on enthalpy relaxation of polystyrene by assuming the existence of an intermediate aging plateau. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 402, 160–165.
- Gutiérrez, C. (2014). Preparation and characterization of polystyrene foams from limonene solutions. *The Journal of Supercritical Fluids*, 92–104.
- Halina Kaczmarek, A. F. (2008). Studies of photochemical transformations in polystyrene and styrene–maleic anhydride copolymer. *Polymer Degradation and Stability*, 93, 1259–1266.
- HAZARD, E. S. (2013). Earth Materials-Lecture 13. *GNH7/GG09/GEOL4002*. Londres.
- Hee Jeung Oh, B. D. (2014). Thermal analysis of disulfonated poly(arylene ether sulfone) plasticized with poly(ethylene glycol) for membrane formation. *Polymer*, 55, 235-247.
- Hee Jeung Oh, B. D. (2014). Thermal analysis of disulfonated poly(arylene ether sulfone) plasticized with poly(ethylene glycol) for membrane formation. *Polymer*, 235-247.
- Houghton, R. J. (1990). *Studies on the plasticization of polymeric tablet binders*. Leicester : The Department of Pharmacy.
- Icoz, D. (2008). *Understanding molecular and thermodynamic miscibility of carbohydrate biopolymers*. New Brunswick: Rutgers, The State University of New Jersey.
- J.A. Durães, A. D. (2006). Absorption and photoluminescence of Buriti oil/polystyrene and Buriti oil/poly(methyl methacrylate) blends. *EUROPEAN POLYMER JOURNAL*, 42, 3324–3332.
- J.E. Martín-Alfonso, J. F. (2014). Ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA)/sunflower vegetable oil polymer gels: Influence of vinyl acetate content. *Polymer Testing*, 37, 78–85.
- Jaíro E. Perilla, L. R. (1999). Mezclade Materiales Poliméricos. Evaluación de las mezclade poliestireno virgen y reciclado. *Revista Ingeniería e Investigación*, 1(44), 80-83.
- Jihuai Tan, S. Z. (2019). Design and synthesis of ethoxylated esters derived from waste frying oil as anti-ultraviolet and efficient primary plasticizers for poly(vinyl chloride). *Journal of Cleaner Production*, 229, 1274-1282.
- Jimenez, R. (2012). Capítulo 2. En *Señales* (págs. 61-94). Lima: Universidad Nacional del Callao.

- Jinge Li, H. L. (2009). Morphologies, crystallinity and dynamic mechanical characterizations of polypropylene/polystyrene blends compatibilized with PP-g-PS copolymer: Effect of the side chain length. *European Polymer Journal* , 45, 2619–2628.
- Jorge Garcia-Ivars, X. W.-X.-I.-C. (2017). Application of post-consumer recycled high-impact polystyrene in the preparation of phase-inversion membranes for low-pressure membrane processes. *Separation and Purification Technology*, 175, 340-351.
- Juho Antti Sirviö, M. V. (2018). Effect of plasticizers on the mechanical and thermomechanical properties of cellulose-based biocomposite films. *Industrial Crops & Products*, 122, 513-521.
- Junsong Li, X. L. (2019). Creating orientated cellular structure in thermoplastic polyurethane through strong interfacial shear interaction and supercritical carbon dioxide foaming for largely improving the foam compression performance. *The Journal of Supercritical Fluids*, 153 , 104577.
- Kailong Jin, J. M. (2015). Tg and Tg breadth of poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)/polystyrene miscible polymer blends characterized by differential scanning calorimetry, ellipsometry, and fluorescence spectroscopy. *Polymer*, 65, 233-242.
- L. Rios-Guerrero, H. K. (2000). Deformation processes in high impact polystyrene as revealed by analysis of arrested cracks. *Polymer* , 5415–5421.
- M. Erber, U. G.-J. (2010). Polystyrene with different topologies: Study of the glass transition temperature in confined geometry of thin films. *European Polymer Journal*, 46, 2240–2246.
- M. Revellino, L. S. (2000). 2.22 - Compression Molding of SMCs. En *Comprehensive Composite Materials* (págs. 763-805). Devon: Cambridge University.
- M.D. Samper, D. G.-S. (2010). Recycling of Expanded Polystyrene from Packaging. . *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 83-91.
- Marius Chanhoun, S. P. (2018). Study of the implementation of waste wood, plastics and polystyrenes for various applications in the building industry. *Construction and Building Materials* , 167 , 936–941.
- Marta Sendra, E. S.-G. (2019). Are the primary characteristics of polystyrene nanoplastics responsible for toxicity and ad/absorption in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*? *Environmental Pollution*, 249, 610-619.
- Meissner, J. (1983). Polymer melt flow measurements by laser doppler velocimetry. *Polymer Testing*, 3(4), 291-301.
- Mi Jang a, b. W. (2017). Widespread detection of a brominated flame retardant, hexabromocyclododecane, in expanded polystyrene marine debris and microplastics from South Korea and the Asia-Pacific coastal region. *Environmental Pollution*, 231, 785-794.
- Mohammed A. Binhussain, M. M.-T. (2013). Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures. *Construction and Building Materials*, 47 , 1431–1435.

- Mohd. Izham Hassan, R. M. (2021). <http://mpoc.org.my/>. Obtenido de <http://mpoc.org.my/>: <http://mpoc.org.my/overview-of-the-global-palm-oil-sector-in-2020-and-outlook-for-2021/>
- Moya, S. (2017). *Thermal Modeling Techniques of Heat Assisted Single Point Incremental Forming in ANSYS Workbench*. Clemson: TigerPrints.
- Nasrin Mehmandost, M. L. (2019). Recycled polystyrene-cotton composites, giving a second life to plastic residues for environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103424.
- Natalia Pérez-Peña, C. C. (2018). Simulation of Drying stresses in Eucalyptus nitens wood. *Bioresources*, 13(1), 1413-1424.
- Nhamo Chaukura, W. G. (2016). Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 57–165.
- Niranjan Patra, M. S. (2013). Surfactant-induced thermomechanical and morphological changes in TiO₂-polystyrene nanocomposites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 405, 103–108.
- Nouha Bakaraki Turan, H. S. (2020). Microplastics in wastewater treatment plants: Occurrence, fate and identification. *Process Safety and Environmental Protection*, 77-84.
- Paola Rizzo, A. R. (2005). Polymorphism of syndiotactic polystyrene: g phase crystallization induced by bulky non-guest solvents. *Polymer*, 46, 9549–9554.
- Patrick A. Leggieri, M. S. (2018). Cloud point and crystallization in fatty acid ethyl ester biodiesel mixtures with and without additives. *Fuel*, 222, 243–249.
- Pauline May Losaria, J.-H. Y. (2019). A highly stretchable large strain sensor based on PEDOT–thermoplastic polyurethane hybrid prepared via in situ vapor phase polymerization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 108-117.
- Paulo César Narváez Rincón, J. A. (2005). Determinación por cromatografía de gases de alquil ésteres (metílico y etílico) de ácidos grasos, en presencia de mono-, di- y triglicéridos. *Ingeniería e investigación*(57), 58-62.
- Peña, C. H. (2013). *Reciclaje termo - mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Poletto, M. (2014). EXPANDED POLYSTYRENE: THERMO-MECHANICAL. En C. LYNWOOD, *POLYSTYRENE SYNTHESIS, CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS* (pág. 320). New York: Nova.
- Rakesh Kumar, P. S. (2021). Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in riverine ecosystem: A review. *Science of the Total Environment*, 146695.

- Rameshwar Adhikari, G. H. (2004). Influence of molecular architecture on morphology and micromechanical behavior of styrene/butadiene block copolymer systems. *Progress in Polymer Science.* , 29, 949–986.
- Ramírez, S. F. (2015). *Formulación de una técnica de reciclaje, para la obtención de un material oligomérico de uso comercial a partir de dos residuos: Poliéstireno expandido de embalaje y aceite residual de cocina*. Bogotá D.C.: Universidad el Bosque.
- Retrieval, w. t. (30 de 05 de 2021). <http://polymerdatabase.com/>. Obtenido de <http://polymerdatabase.com/>: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Fox.html>
- Rojas-Molina A, H.-R. G.-M.-L.-C.-R.-S. (2012). Diseño de tarjeta electrónica genérica para el control de motores trifásicos. *Ingeniería Investigación y Tecnología.* , XIII(1), 21-31.
- Rong Guan, B. X. (2006). The processing–structure relationships in thin microcellular PET sheet prepared by compression molding. *European Polymer Journal* , 42, 1022–1032.
- S. Myint, M. Z. (2010). Paints Based on Waste Expanded Polystyrene. ,. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 1-10.
- S. Zeeb and S. Hijring, F. G. (1997). The influence of copolymerization and plasticization on the ab splitting behaviour of the glass transition in poly(n-alkylmethacrylate)s . *Polymer*, 38(16), 4011-4018.
- S.M. Sapuana, D. B. (2012). Mechanical Properties of Sugar Palm Fibre Reinforced High Impact Polystyrene Composites. *Procedia Chemistry* , 4 , 101–106.
- Saido, K. (2015). Global styrene oligomers monitoring as new chemical contamination from polystyrene plastic marine pollutio. *Journal of Hazardous Materials*, 359–367.
- Shiming Chena, L. T. (2004). The study of poly(styrene-co-p-(hexafluoro-2-hydroxyisopropyl)-a-methyl-styrene)/poly(propylene carbonate) blends by ESR spin probe and Raman. *Polymer* , 45 , 3045–3053.
- Sjollema, S. B. (2016). Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? . *Aquatic Toxicology.*, 259–261.
- Sourbh Thakur, A. V. (2018). Recent developments in recycling of polystyrene. *Green and Sustainable Chemistry*, 13, 32–38.
- Tahar Masri, H. O. (2018). Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes. *Construction and Building Materials*, 164 , 410–418.
- Takumi Sako, J. D. (2019). Anomalous viscosity decrease of polycarbonate by addition of polystyrene. *Polymer*, 170 , 135–141.
- Tatara, R. A. (2017). 14 Compression Molding. En *Applied Plastics Engineering Handbook* (págs. 291-320). Illinois: Department of Technology.

- Ting Zheng, Z. W. (2018). Structural modification of waste cooking oil methyl esters as cleaner plasticizer to substitute toxic dioctyl phthalate. *Journal of Cleaner Production*, 186, 1021-1030.
- UK, W. (2014). *Disposal of Fats, Oils, Grease and Food Waste*. Londres: London government.
- Vamsi Krishna Balla, K. H. (2019). Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects . *Composites Part B* , 174 , 106956.
- Villarreal, C. d. (2005). *Síntesis de oligómeros de PS funcionalizados con grupos peroxídicos a partir de un iniciador cíclico multifuncional: Potencial aplicación en la síntesis de IPNs parcialmente termodisociables*. Saltillo: Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Villarreal, C. d. (2005). *Síntesis de oligómeros de PS funcionalizados con grupos peroxídicos a partir de un iniciador cíclico multifuncional: Potencial aplicación en la síntesis de IPNs parcialmente termodisociables*. Coahuila: Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Wei Liu, Y. P. (2019). Dependence of the foaming window of a polystyrene/poly(methyl methacrylate) blend on structural evolution driven by phase separation. *Polymer*, 166, 63–71.
- Wu, C. (2015). Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam. *Environmental Pollution*, 117-123.
- Wypych, G. (2017). *Handbook of Plasticizers*. Toronto: ChemTec Publishing.
- Yohei Miwa, Y. K. (2018). The effects of local glass transition temperatures of ionic core-shell structures on the tensile behavior of sodium-neutralized poly(ethylene-co-methacrylic acid) ionomer/lauric acid blends. *Polymer* , 148, 303-309.

Apéndice.

Proyecto de reciclaje y caracterización mecánica

Como producto del estudio de plastificación del poliestireno por la oleína de palma, se realizó un laboratorio-taller **Figura A- 1** de fabricación de cerámica plástica marmoleada, producto similar a la cerámica, pero a partir de la plastificación del poliestireno expandido de embalaje (EPS) y aceite residual de cocina (ARC). Debido a su naturaleza química el material fue llamado: material oligoestirénico, oligo-: oligómeros de los ácidos grasos del ARC y -estirénico: del EPS. El laboratorio este compuesto por una trituradora, un homogeneizador, una prensa hidráulica, un sistema de control de emisiones, troqueles, vale de enfriamiento y zona de carpintería.



Figura A- 1: Laboratorio/taller de reciclaje de ARC y EPS.

El MOE-E (Material oligoestirénico-Extruido) fue previamente realizado de una manera manual, mezclando espuma de poliestireno expandido, obtenida de desechos urbanos, plastificado con aceite residual de cocina, en su mayoría aceite de soya, el cual se adquirió puntualmente de un restaurante. Este material previamente obtenido, se trituró a un diámetro de partícula cercano a 1 cm de

diámetro, el cual fue extruido, el material mezclado se granuló y se prensó a 2 diferentes temperaturas (**Figura A- 2**). (Tahar Masri, 2018).



Figura A- 2: *Fabricación del MOE-130-E/Laboratorio de ingeniería química (LIQ) UNAL.*

El prototipo de material oligoestirénico (MOE-P) proviene del trabajo académico denominado: “Formulación de una técnica de reciclaje, para la obtención de un material oligomérico de uso comercial a partir de dos residuos: Poliestireno expandido de embalaje y aceite residual de cocina”, obteniendo la composición del material donde sus condiciones de fabricación se realizaron mediante mezcla física de poliestireno expandido de embalaje residual (**Figura A- 3**), y aceite de soya residual de cocina, realizando un calentamiento del fluido a 140 °C con un volumen de 400mL introduciendo posteriormente 800g donde al estar en el estado fundido se procedió a comprimirlo en un molde de troquelado cerca de 1 tonelada de presión (Ramírez, 2015).



Figura A- 3: Baldosines del MOE-P

El análisis esfuerzo deformación de las muestras de MOE analizaron en las siguientes imágenes, con ello la muestra moldeada a 130 °C, mostró un esfuerzo máximo a la ruptura de 7,82 MPa (**Figura A- 4**) con una deformación de 1,59 % (**Figura A- 5**), mucho menor que el poliestireno virgen. El módulo de elasticidad fue de 0,530 GPa para el MOE130-E, siendo la mitad de las muestras anteriores (Mohammed A. Binhussain, 2013).

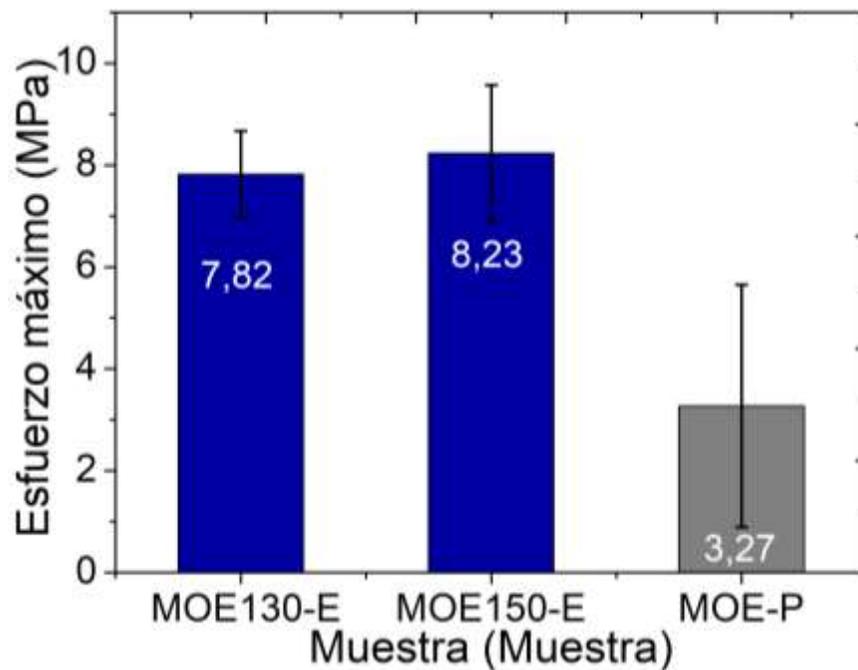


Figura A- 4: Comportamiento de esfuerzo último del MOE.

En la **(Figura A- 4)** correspondiente al comportamiento elástico de la muestra de MOE-E, se observa como esta es calentada hasta 150 °C, y posee una distribución cercana entre ambas curvas generadas. Los altos valores de esfuerzo fueron un poco más frágiles que el anterior, con un máximo de 8,23 MPa, y una deformación a la falla de 1,81 % **(Figura A- 5)** (Rameshwar Adhikari, 2004), para esta muestra el módulo de Young fue de 0,507 GPa, levemente menor al anterior. Similar a la muestra anteriormente fabricada, hay una discontinuidad leve cerca de los 0,5 %, mostrando esfuerzos residuales durante el experimento de tensión (Marius Chanhoun, 2018).

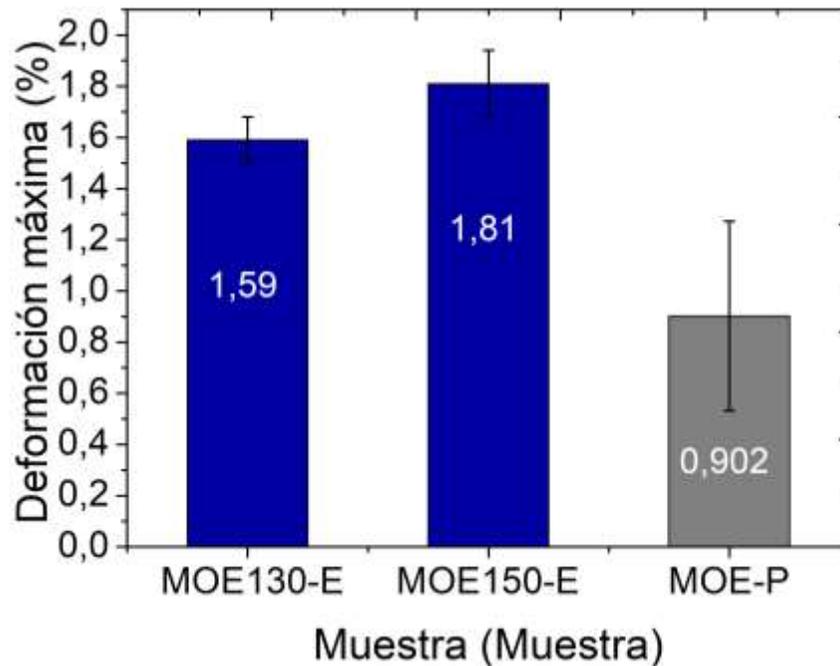


Figura A- 5: *Comportamiento de deformación último del MOE.*

En lo que concierne al MOE-P el esfuerzo máximo fue 3,27 MPa, mucho menos que el poliestireno original **(Figura A- 4)**. Sin embargo, el porcentaje de deformación comparado con el poliestireno sin plastificar es muy similar con un valor de 0,902 % **(Figura A- 5)**. En lo que concierne el módulo de Young se obtuvo un valor de 0,5397 GPa.

Cambios del módulo de Young con la temperatura de moldeo.

El módulo de Young se encontró afectado directamente por la temperatura de moldeo mostrando una pendiente negativa entre los dos puntos establecidos como se observa en la **(Figura A- 6)** Este comportamiento se podría asociar a la presencia de burbujas dentro de la matriz, como discontinuidades, de la fase blanda anteriormente nombrada, la cual se compone de aceite usado de cocina, donde al aumentar la temperatura la dispersión de dichas burbujas aumenta, beneficiando la deformación y así reduciendo el módulo.

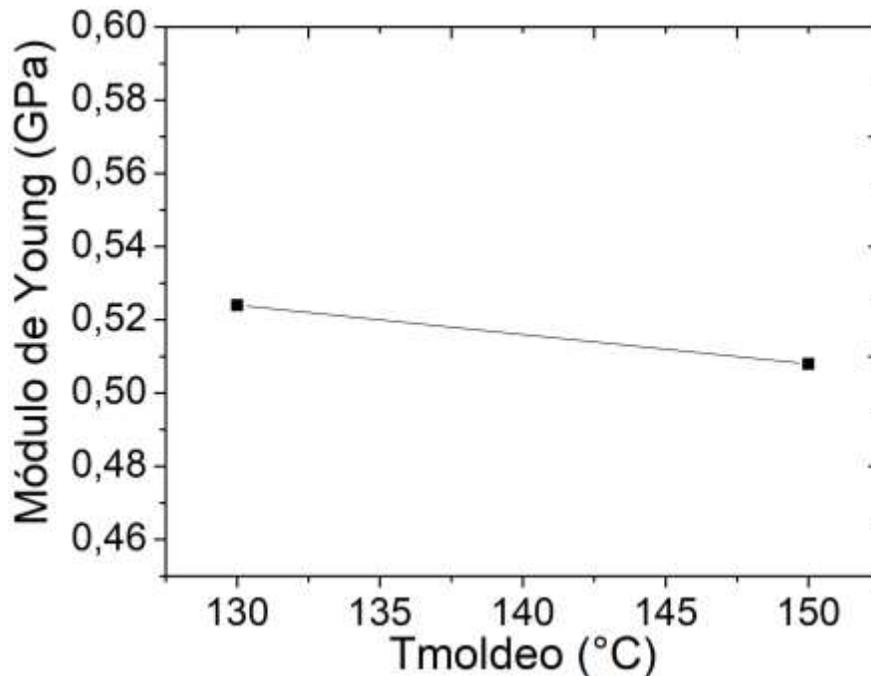


Figura A- 6: Módulo de Young con respecto a la temperatura de moldeo.

Esfuerzo máximo a la falla de pisos típicos y el MOE-P.

Finalmente, la a continuación muestra la relación entre los materiales usados frecuente mente para la fabricación de pisos con el material del presente estudio. En cuanto a los materiales de menor esfuerzo a la fractura comparados con el MOE-P, como son la arenisca y la madera de eucalipto, con un esfuerzo último a la falla de 1 MPa a 3 MPa respectivamente **(Figura A- 7)**. Los demás materiales reflejan propiedades similares al MOE-P, donde tienen un valor de 4 MPa para el concreto

y el basalto, solo 0,3 MPa más fuertes que el material reciclado basado en poliestireno (HAZARD, 2013), (Natalia Pérez-Peña, 2018). Lo anterior sirve para validar el uso del MOE como alternativa al eucalipto y al concreto.

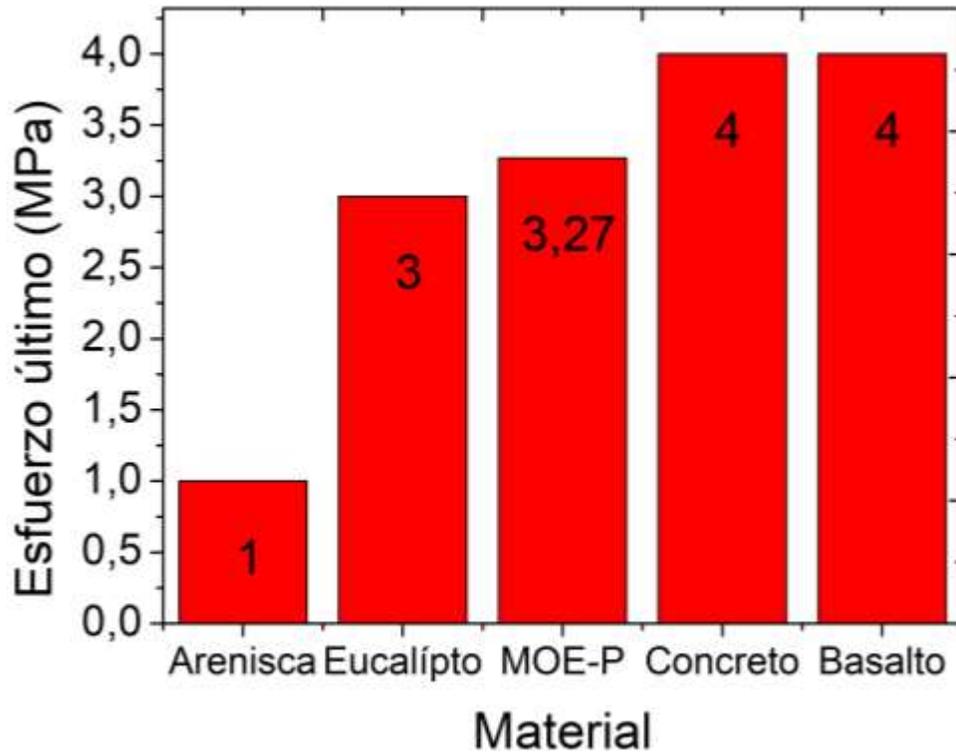


Figura A- 7::Resistencia a la ruptura de diferentes materiales.

Comparado con los materiales vírgenes el MOE-E posee un menor esfuerzo al ser un producto proveniente del reciclaje de poliestireno expandido de embalaje y las impurezas que podría tener el aceite, sin contar las degradaciones previas en los procesos de cocción. De lo anterior se concluye que las propiedades de esfuerzo son afectadas fuertemente al ser reciclado, pero que varían a diferentes temperaturas de moldeo. A pesar de ello la propiedad de deformación no se ve ampliamente afectada, al poseer propiedades cercanas a los materiales vírgenes.

Concluyendo así que el material al ser plastificado mejora su capacidad de almacenamiento de energía, pero disminuye sus esfuerzos últimos en la mezcla con el plastificante. La dependencia de las propiedades mecánicas del MOE, varían

según la presión ejercida en el moldeo, puesto que, a mayor presión menor es la posibilidad de fractura, al prevenir la aparición de cavidades dentro de la muestra.

En la sección de reciclaje se condensa la finalidad del estudio pues se concluye que el MOE-P sirve de alternativa para reemplazar los materiales como el eucalipto, gracias a que el material objeto del presente estudio tiene mejores propiedades mecánicas; especialmente en el esfuerzo a la fractura con el cual se podría implementar de manera efectiva y eficaz en pisos y fachadas de manera de alternativa a los decks de eucalipto y las losas de concreto.