

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE MUESTRAS DE EPS POS CONSUMO, UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y SOMETIDAS A UN PROCESO DE RECUPERACIÓN

Gina Paola Barrera Castro



Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Mecánica

Bogotá, Colombia

2016

Caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de muestras de EPS pos consumo, utilizadas en la industria de alimentos y sometidas a un proceso de recuperación

Gina Paola Barrera Castro

Tesis de maestría para optar el título de
Magíster en Ingeniería Mecánica

Directora:

Luz Marina Ocampo Carmona
Ingeniera Química, M. Sc y D. Sc

Codirector:

John Jairo Olaya Flórez
Ingeniero metalúrgico, M. Sc y PhD.

Línea de investigación:

Reciclaje de polímeros

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Mecánica

Bogotá, Colombia

2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

Los abajo firmantes certifican que han leído y aprueban la tesis de maestría titulada **Caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de muestras de EPS pos consumo, utilizadas en la industria de alimentos y sometidas a un proceso de recuperación**, presentado por **Gina Paola Barrera Castro** como requisito parcial para optar al título de **Magíster en Ingeniería- Ingeniería Mecánica**.

Fecha: _____

Directora: _____

Dr. Luz Marina Ocampo Carmona

Codirector: _____

PhD. John Jairo Olaya Flórez

Jurados: _____

*A pessimist sees the difficulty in every opportunity;
an optimist sees the opportunity in every difficulty.*

WINSTON CHURCHILL

Dedico este trabajo a Dios, quien me consiente, me cuida y me da sabiduría; a mi esposo John Jairo por el tiempo y las manos brindadas; a mis directores Luz Marina y John Jairo por la confianza y apoyo; y a mi mamá Bertilda porque siempre ha confiado en mi capacidad y me ha protegido con sus oraciones.

TABLA DE CONTENIDO

Índice de tablas	X
Índice de figuras	XII
Resumen	XVI
Agradecimientos	XVII
Introducción	1
1. Marco teórico	4
1.1.Generalidades de los Polímeros	4
1.1.1. Polímero.....	4
1.1.2. Clasificación de los polímeros.....	4
1.1.3. Poliestireno.....	9
1.1.4. Poliestireno Expandido (EPS)	16
1.2. Estado del Arte Reciclaje de EPS.....	19
1.3.Propiedades Mecánicas Estudiadas.....	31
1.3.1. Influencia de los enlaces atómicos en las propiedades mecánicas del EPS.....	31
1.3.2. Resistencia a flexión.....	32
1.3.3. Resistencia a compresión.....	35
1.3.4. Resistencia al impacto.....	37
1.4.Propiedades Térmicas Estudiadas.....	38
1.4.1. Temperatura de transición vítrea (Tg).....	38
1.4.2. Calor específico (c).....	39
1.4.3. Conductividad térmica (k).....	41
1.4.4. Difusividad térmica (α).....	41
1.5. Demostración de la Ecuación General de Transmisión de Calor por Conducción en Estado No Estacionario.....	42
1.6. Algunas Técnicas Físicas Para El Estudio De Los Polímeros...	45

1.6.1.	Espectroscopia infrarroja.....	45
1.6.2.	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)..	50
1.6.3.	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	52
1.6.4.	Equipo de Plato Caliente.....	52
1.6.5.	Maquina universal de ensayos.....	54
1.6.6.	Ensayo de impacto Izod sin muesca.....	55
2.	Normativa ambiental	58
2.1.	Introducción.....	58
2.2.	Nacional.....	58
2.3.	Internacional.....	63
3.	Materiales y Métodos	66
3.1.	Introducción.....	66
3.2.	Preparación de formulaciones.....	67
3.2.1.	Esquema general de trabajo a realizar.....	67
3.2.2.	Preparación de las muestras.....	67
3.3.	Método de espectrofotometría de infrarrojos.....	70
3.4.	Métodos para medición de propiedades mecánicas.....	71
3.4.1.	Método para medición de resistencia a com- presión.....	71
3.4.2.	Método para medición de resistencia a flexión	71
3.4.3.	Método para medición de resistencia al im- pacto.....	72
3.5.	Métodos para medición de propiedades térmicas.....	74
3.5.1.	Método para medición de transición vítrea y cálculo del calor específico.....	74
3.5.2.	Método para análisis térmico gravimétrico...	74
3.5.3.	Método para la medición de la conductividad Térmica y cálculo de la difusividad térmica...	75
3.5.4.	Método para simular el perfil unidimensional de la temperatura en estado no estacionario, para	

	cada uno de los materiales estudiados.....	76
4.	Resultados y análisis de resultados	82
4.1.	Introducción.....	82
4.2.	Ensayo espectroscopia de infrarrojo.....	82
4.3.	Ensayos físicos de resistencia a compresión.....	85
4.4.	Ensayos físicos de resistencia a flexión.....	86
4.5.	Ensayos físicos de resistencia al impacto.....	87
4.6.	Técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	88
4.7.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	89
4.8.	Medición de conductividad térmica en plato caliente en régimen estacionario.....	90
4.9.	Perfil unidimensional de temperatura en estado no estacionario.	92
4.9.1.	Perfiles de distribución de temperatura obtenidos en Octave 3.6.4.....	92
5.	Conclusiones	98
A.	Appendix 1	101
A.1.	Curvas Compresión – Deformación obtenidas de acuerdo a las especificaciones dadas en las normas ASTM D7557-09 y D1621-10.....	101
A.2.	Cálculos para determinar los parámetros mecánicos a partir de las curvas de compresión–deformación.....	103
A.3.	Curvas flexión – Deformación obtenidas de acuerdo a las especificaciones dadas en la norma C203-05(2012).....	109
A.4.	Cálculos para determinar Calor específico (C_p).....	111
A.5.	Cálculos para determinar difusividad térmica (α).....	111
A.6.	Termogramas TGA.....	112
A.7.	Cálculos para determinar el momento máximo en el ensayo de flexión de 3 puntos	116
A.8.	Tablas de datos perfil de distribución de temperaturas por material estudiado	119

B. Appendix 2	127
B.1. Ficha Técnica Caja Multiproposito. Uso: Transporte de fruta.....	127
B.2. Ficha Técnica Materia Prima. Poliestireno Expandible Ming Dih Industry Co., LTD.....	128
B.3. Ficha Técnica del Equipo. Expansora 1.....	129
B.4. Ficha Técnica del Equipo. Inyectora Automática 1. Lendle LA 90-70-20....	130
C. Appendix 3	131
C.1. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 0. Programa octave 3.6.4.....	131
C.2. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 10. Programa octave 3.6.4.....	132
C.3. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 15. Programa octave 3.6.4.....	133
C.4. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 20. Programa octave 3.6.4.....	134
Glosario	135
Bibliografía	137

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades del Poliestireno. Fuente: Autora [22, 24-25].....	16
Tabla 1.2: Configuración del poliestireno. Fuente: Autora basada en [15, 37-39].....	20
Tabla 1.3: Desarrollos regionales con impactos globales de la industria petroquímica Fuente: [41].....	22
Tabla 1.4: Categorías de reciclado de EPS. Fuente: Autora basada en [47,51-52 y 59].....	26
Tabla 1.5: Resumen de ecuaciones resistencia a flexión. Fuente: Autora basada en [28]	35
Tabla 1.6: División de espectro IR. Fuente: [85].....	47
Tabla 1.7: Frecuencias características de grupos orgánicos poliatómicos. f=fuerte, m=medio, d=débil. Fuente: [86].....	49
Tabla 1.8: Frecuencias características de grupos inorgánicos poliatómicos. f=fuerte, m=medio, d=débil a=agudo. Fuente: [86].....	50
Tabla 2.1: Normativa ambiental de gestión de residuos sólidos en Colombia y Bogotá D.C. Fuente: Recopilación Autora.....	63
Tabla 2.2: Política internacional del medio ambiente. Fuente: Recopilación Autora....	65
Tabla 3.1: Codificación de los materiales fabricados. Fuente: Autora.....	67
Tabla 3.2: Tabla de masas en gramos utilizada en las formulaciones. Fuente: Autora..	67
Tabla 4.1: Asignación de las bandas de absorción FTIR de los materiales en estudio EPS ₀ , EPS ₁₀ , EPS ₁₅ y EPS ₂₀ . Fuente: Autora.....	85
Tabla 4.2: Datos obtenidos del ensayo físico de resistencia a compresión. Fuente: Autora.....	86
Tabla 4.3: Datos obtenidos del ensayo físico de resistencia a la flexión. Fuente: Autora.....	87

Tabla 4.4: Datos obtenidos del ensayo físico de resistencia al impacto. Fuente: Autora.....	88
Tabla 4.5: Resultados de temperatura de transición vítrea y calor específico obtenidos a través de la técnica DSC. Fuente: Autora.....	88
Tabla 4.6: Resultados de temperatura de inicio de degradación en cada uno de los materiales estudiados obtenidos a través de la técnica TGA. Fuente: Autora.....	90
Tabla 4.7: Datos de conductividad térmica y tiempo de exposición hasta alcanzar el régimen estacionario a través de la técnica de plato caliente. Fuente: Autora.....	92
Tabla A.1. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS ₀ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora.....	105
Tabla A.2. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS ₁₀ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora.....	106
Tabla A.3. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS ₁₅ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora.....	107
Tabla A.4. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS ₂₀ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora.....	108
Tabla A.5. Resultados de los cálculos de calor específico a partir de las curvas proporcionadas por el DSC. Fuente: Autora.....	111
Tabla A.6. Cálculos para determinar teóricamente la difusividad térmica de acuerdo a la ecuación (1.11) explicada en la sección 1.4.4. Fuente: Autora.....	111
Tabla A.7. Distribución Lineal de la temperatura en una placa de EPS ₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario. Fuente: Autora.....	120
Tabla A.8. Distribución Lineal de la temperatura en una placa de EPS ₁₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario. Fuente: Autora.....	122
Tabla A.9. Distribución Lineal de la temperatura en una placa de EPS ₁₅ de espesor 0,50m, en estado no estacionario. Fuente: Autora.....	124
Tabla A.10. Distribución Lineal de la temperatura en una placa de EPS ₂₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario. Fuente: Autora.....	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Estructura química del poliestireno. Fuente: [8].....	4
Figura 1.2: Representación esquemática de estructuras moleculares (a) lineal, (b) ramificada (c) entrecruzada y (d) reticulada (tridimensional). Los círculos representan unidades monoméricas. Fuente: [10]	5
Figura 1.3: Configuración isotáctica del polímero Polipropileno (PP). Fuente: [11]...	6
Figura 1.4: Configuración sindiotáctica del Polipropileno (PP). Fuente: [11]	7
Figura 1.5: Configuración atáctica del Polipropileno (PP). Fuente: [11].....	7
Figura 1.6: Estructura molecular del monómero de estireno. Fuente: Autora basada en [15-16].....	9
Figura 1.7: Estructura de los procesos reacción del benceno con el etileno dando origen al etilbenceno y su posteriormente deshidrogenación y purificación para obtener estireno. Fuente: Autora basada en [15-16]	9
Figura 1.8: Formula química condensada del poliestireno. Fuente:Autora basada en[18]	10
Figura 1.9: Diagrama del proceso para la elaboración del poliestireno. Fuente: Autora basada en [16].....	10
Figura 1.10: Estructura química del subproducto divilbenceno. Fuente: Autora.....	14
Figura 1.11: Perlas de Poliestireno expandible. Fuente: [28].....	17
Figura 1.12: Perlas expandidas. Fuente: [29].....	17
Figura 1.13: Aplicaciones de poliestireno expandido en Colombia. (a) Construcción (b) Embalaje electrónico (c) Embalaje de alimentos - neveras (d) Cañuelas (e) Geobloques. Fuente: [30-31].....	18
Figura 1.14: Figura de Ensayo de flexión en tres puntos. Fuente: Adaptación de autora basada en [23].....	32
Figura 1.15: Diagrama de esfuerzos compresivos, de tracción y momentos de flexión en una muestra sometida a flexión. Fuente: [28].....	33

Figura 1.16: Diagrama de esfuerzos y deformación de la muestra sometida a flexión (a) deformación unitaria longitudinal, E_x (b) Esfuerzos normales, σ_x . Fuente: [28].....	34
Figura 1.17: Muestra sometida a carga por compresión. Fuente: Autora.....	37
Figura 1.18: Gráfico de la Temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea en función del peso molecular. Fuente: [23]	39
Figura 1.19: Esquema de un trazo de DSC alrededor de T_g . Fuente: [80]	40
Figura 1.20: Flujo de energía a través de un elemento de longitud dx y sección $dzdy$. Fuente: Autora	43
Figura 1.21: Vibraciones de tensión “stretching” (a) Simétrica (b) Antisimétrica. Fuente: [83].....	46
Figura 1.22: Vibraciones de flexión “bending” (a) Balanceo en plano (b) Tijereteo en plano (c) Aleteo fuera del plano (d) Torsión fuera del plano. Fuente: [83].....	46
Figura 1.23: Fenómenos de absorción, transmisión y reflexión de la radiación electromagnética al interactuar con la materia. Fuente: [85].....	47
Figura 1.24: Equipo DSC. Fuente: [29]	51
Figura 1.25: Equipo DSC. (a) Celula del DSC donde se ubican la muestra en estudio y el material de calibración. (b) Diagrama de los calentadores individuales. Fuente: [29][75]	51
Figura 1.26: (a) Dibujo esquemático del equipo de platos calientes. Fuente: [87] (b) Dibujo pictórico del equipo de platos calientes. Fuente: Autora.....	53
Figura 1.27: Resumen de los modos de deformación del ensayo a compresión. Fuente: [76].....	55
Figura 1.28: Equipo para Ensayo de impacto Izod. Fuente: [88].....	57
Figura 1.29: Ubicación de la muestra sobre el banco del equipo. (a) Fotografía del Ensayo. (b) Grafico según la norma ASTM 4812-11. Fuente: [88] y Autora.....	57
Figura 3.1: Tamaño de la grana de EPS después de molido. Fuente: Autora.....	68
Figura 3.2: Residuo molido. Fuente: Autora.....	68
Figura 3.3: Diagrama de bloques de las operaciones realizadas con el material. Fuente: Autora	69
Figura 3.4: Placa de conductividad térmica constante y espesor L , extendida al infi-	

nito en las otras dimensiones. Fuente: Autora.....	77
Figura 3.5: Ubicación nominal de puntos que describen la transferencia de calor unidimensional para aproximación de la derivada de un función por diferencias finitas. Fuente: Autora basada en [76].....	78
Figura 3.6: Molécula computacional que representa la medición de diferentes temperaturas en eje x de la placa en estudio en diferentes instantes de tiempo con su respectiva notación. Fuente: Autora basada en [76].....	79
Figura 4.1: Espectro infrarrojo para muestras en polvo de poliestireno expandido: (a) EPS ₀ , (b) EPS ₁₀ , (c) EPS ₁₅ , (d) EPS ₂₀ . Fuente: Autora.....	83
Figura 4.2: Análisis térmico gravimétrico para cuatro muestras de cada una de las formulaciones: (a) EPS ₀ , (b) EPS ₁₀ , (c) EPS ₁₅ , (d) EPS ₂₀ . Fuente: Autora.....	89
Figura 4.3: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS ₀ para una difusividad térmica de $\alpha=4,9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	93
Figura 4.4: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS ₁₀ para una difusividad térmica de $\alpha=6,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	94
Figura 4.5: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS ₁₅ para una difusividad térmica de $\alpha=4,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	95
Figura 4.6: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS ₂₀ para una difusividad térmica de $\alpha=2,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	96
Figura A.1.1: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de EPS ₀ . Fuente: Autora.....	101
Figura A.1.2: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de la formulación EPS ₁₀ . Fuente: Autora.....	101
Figura A.1.3: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de la formulación EPS ₁₅ . Fuente: Autora.....	102
Figura A.1.4: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de la formulación EPS ₂₀ . Fuente: Autora.....	102
Figura A.2.1: Resistencia a la compresión. Fuente: [90].....	103
Figura A.3.1: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS ₀ . Fuente: Autora	109
Figura A.3.2: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS ₁₀ . Fuente: Autora	109

Figura A.3.3: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS ₁₅ . Fuente:Autora	110
Figura A.3.4: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS ₂₀ . Fuente:Autora	110
Figura A.6.1: Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS ₀ . Fuente:Autora	112
Figura A.6.2: Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS ₁₀ . Fuente:Autora	113
Figura A.6.3: Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS ₁₅ . Fuente:Autora	114
Figura A.6.4. Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS ₂₀ . Fuente:Autora	115

RESUMEN

En este trabajo se fabricaron tres materiales con mezclas de Poliestireno Expandido (EPS) virgen grado S3 y material reciclado proveniente de cajas de EPS multipropósito, las últimas fueron sometidas a lavado y trituración en un molino de aspas, con porcentajes en peso de material reciclado de 10, 15 y 20%. Mediante espectroscopia infrarroja no se evidenció en los materiales fabricados grupos oxigenados formados por agentes ambientales o la conformación de estructuras intermedias que afecten las características de los componentes de partida, esto comparado con el material virgen.

Las propiedades mecánicas de estos materiales fueron evaluadas mediante los ensayos de resistencia a compresión, flexión e impacto y las propiedades térmicas mediante las técnicas de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Termogravimetría (TGA), plato caliente en régimen estacionario y se simularon los perfiles de temperaturas en régimen no estacionario a través de Octave 3.6.4.

Los resultados obtenidos en las tres mezclas fabricadas muestran poca variación de las propiedades a compresión, impacto, transición vítrea, y difusividad térmica con respecto al material de referencia (EPS virgen grado S3). Los termogramas obtenidos de la técnica TGA evidencian homogeneidad de las mezclas dada la regularidad de las caídas de la pérdida de masa en función de la temperatura. La resistencia a la flexión presenta disminución de la carga máxima de rotura con respecto al material virgen y la conductividad térmica presenta un mínimo aumento alcanzando los 0,07W/mK, disminuyendo su capacidad aislante. Los materiales fabricados pueden emplearse industrialmente para producir embalaje, casetones y esferas, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a DIOS, quien está al frente de todo lo desarrollado durante esta investigación...

A mi esposo John Jairo, porque sin duda alguna es parte fundamental de todos mis logros.

A mis directores de tesis Luz Marina Ocampo y John Jairo Olaya pues hicieron parte de un equipo perfectamente engranado, sumando con sus conocimientos para el desarrollo de esta tesis de investigación.

A la Universidad Nacional de Colombia por proveer todos los equipos, espacios y financiación para la realización de esta investigación.

A Aislapor S.A. por facilitar las instalaciones, equipos, materias primas y secundarias y la información necesaria para la ejecución de este proyecto.

Gina Paola

INTRODUCCIÓN

Aislapor S.A. es una industria Colombiana transformadora de Poliestireno Expandible, hace algunos años atrás era también productora de poliestireno, pero con la globalización, es ahora más rentable y reduce riesgos humanos, el comprar las perlas de Poliestireno Expandible provenientes generalmente de Taiwan.

La gama de productos de Poliestireno Expandido (EPS) que comercializa este tipo de industrias se dividen en dos: soluciones de larga duración, con productos como los geobloques, las cornisas, los sistemas de aislamiento para construcción, neveras, entre otros; siendo la resistencia mecánica, la baja conductividad y difusividad térmica, y la versatilidad en el termoformado; propiedades que lo convierten en un material útil para diferentes mercados. Otra gama es la de corta duración, donde se encuentran productos como las cajas multipropósito, sistemas de embalaje para transporte de mercancías frágiles, estibas y casetones, por mencionar algunos; los cuales, aunque poseen las mismas bondades del grupo anterior finalizan su vida útil, en el mejor de los casos, como desechos sólidos que llegan a los rellenos sanitarios de diferentes ciudades.

Tan solo a nivel nacional, la composición de residuos sólidos es en su mayoría de residuos orgánicos con un 65%, seguida por los plásticos con un 14% [1]. En particular en Bogotá, es apenas marginal el reciclaje de los plásticos si se compara con las demás familias de materiales empleados en empaques y envases. De acuerdo con promedios históricos cerca de 16500 toneladas de plásticos por mes van a parar al relleno Sanitario de Doña Juana. [2]

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de la cuna hasta la tumba, de estos productos de corta duración, elaborado por *Industry Alliance Packaging*, tomando como base de estudio 1000 unidades de empaque de EPS para aspiradoras, determinaron emisiones ambientales en las categorías de calentamiento global (por CO₂ y CH₄), acidificación (por SO_x, NO_x y NH₃), eutrofización (por SO_x, NO_x y NH₃) y fotoquímica (por C₅H₁₂, CO, CH₄ y HC's), donde en la mayoría de los casos (exceptuando el aporte de C₅H₁₂) se logra reducir de 3 al 14% estas

emisiones, presentando la alternativa de un proceso de producción de circuito cerrado, es decir, donde se utilice material recuperado para luego reciclarlo en el proceso de producción y mezclarlo con material virgen. Para el estudio se consideraron 2 opciones de este tipo de proceso: al 10% de recuperación y al 20% de recuperación. [3]

Esta es una propuesta de sustentabilidad ambiental para este tipo de industria colombiana, que además hace parte de la cadena efectiva del ciclo de vida de los residuos del petróleo refinado. En este sentido tanto AISLAPOR S.A como la Asociación Colombiana de Plásticos (ACOPLASTICOS), muestran que existe en la actualidad más de 40 empresas de reciclaje en Colombia ubicadas en las principales ciudades del país como Bogotá, Villavicencio, Medellín, Pasto, Neiva, Santa Marta, Cartagena, Buga e Itagui.

Sin embargo, a pesar de la variedad de métodos que prolongan la vida útil del EPS, la mayoría de estas empresas recicladoras, practican la categoría primaria de reciclaje y la categoría secundaria de EPS de embalaje pos consumo, sin abarcar los desechos de la industria alimentaria (ver tabla 1.4). Esto puesto que para las empresas transformadoras de EPS, el reciclado de los desechos plásticos industriales es homogéneo y su reciclaje no presenta problemas significativos, reciclando internamente la mayor parte de termoplásticos que producen, estimado del 10% al 30% de la producción, descuidando el desecho generado por el EPS pos consumo con residuos de alimentos. [4]

Es posible reciclar vasos de EPS, existen resultados en cuanto a las propiedades de este desecho sometido a lavado y peletizado con una extrusora monousillo en caliente, al evaluar mezclas de material virgen y reciclado, se determina degradación en cuanto al índice de fluidez y la resistencia al impacto de la mezcla. Otras propiedades medidas son la elongación, esfuerzo en el punto de fluencia y esfuerzo de ruptura las cuales mostraron poca afectación. [5]

Aunque los equipos mencionados para este tipo de reciclaje no son comúnmente usados en industrias transformadoras de EPS, siendo una de las causas por las cuales estas propuestas no son viables económicamente, sí muestran la posibilidad de introducir al ciclo productivo el material reciclado. Sin embargo se hace necesario realizar estudios que permitan corroborar la afectación de la propiedades del material reciclado pos consumo con residuos

de alimentos, haciendo uso de los equipos con los que cuenta AISLAPOR S.A. y realizando mezclas entre el material virgen y el fabricado, de tal manera que se puedan revisar posibles aplicaciones y motivar a estas empresas a ser parte de la sustentabilidad ambiental propuesta por el análisis de ciclo de vida.

MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades de los Polímeros

1.1.1. Polímero

El término polímero significa muchas partes, es decir, muchas unidades monoméricas. Es una gran molécula construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples, estas unidades se conocen con el nombre de *monómero*. Son largas secuencias de átomos o grupos de ellos, unidos por enlaces primarios, covalentes o lineales, aunque también es posible encontrar arreglos tridimensionales [6-7].

La cadena está constituida normalmente por átomos de carbono sin embargo también se puede sintetizar algunos polímeros basados en el silicio. Uno de los polímeros más comunes es el poliestireno, se obtiene por polimerización del estireno; se sacrifica el doble enlace para proporcionar los enlaces que dan lugar a la cadena como se muestra en la figura 1.1.

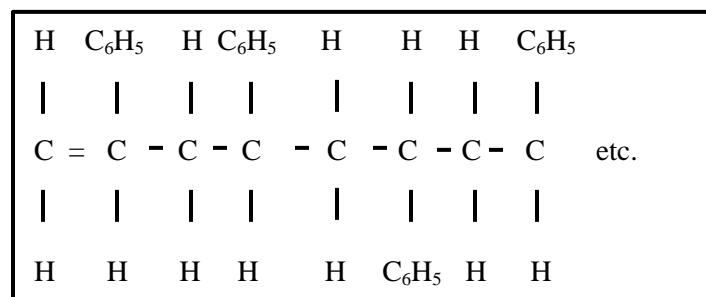


Figura 1.1: Estructura química del poliestireno. Fuente: [8]

1.1.2. Clasificación de los polímeros

Existe variedad de formas para clasificar los polímeros; según su procedencia, su estructura de las cadenas moleculares, su tacticidad, su respuesta mecánica frente a la

temperatura y el mecanismo utilizado para su polimerización, a continuación se desarrollan cada una de ellas.

Según su procedencia [9]

Naturales: Son aquellos procedentes de las plantas o los animales, estos incluyen entre otros seda, lana, látex, madera y caucho. El grupo particular de polímeros naturales como la celulosa, el almidón y las proteínas tienen importancia en los procesos fisiológicos y bioquímicos de los animales y las plantas.

Sintéticos: A partir del estudio de la estructura molecular de los polímeros naturales se han desarrollado numerosos polímeros sintetizados a partir de moléculas orgánicas. Son fundamentalmente derivados del petróleo.

Según la estructura de las cadenas moleculares [10], aunque algunos polímeros no pertenecen solo a uno de estos grupos (Ver figura 1.2(a)-(d)).

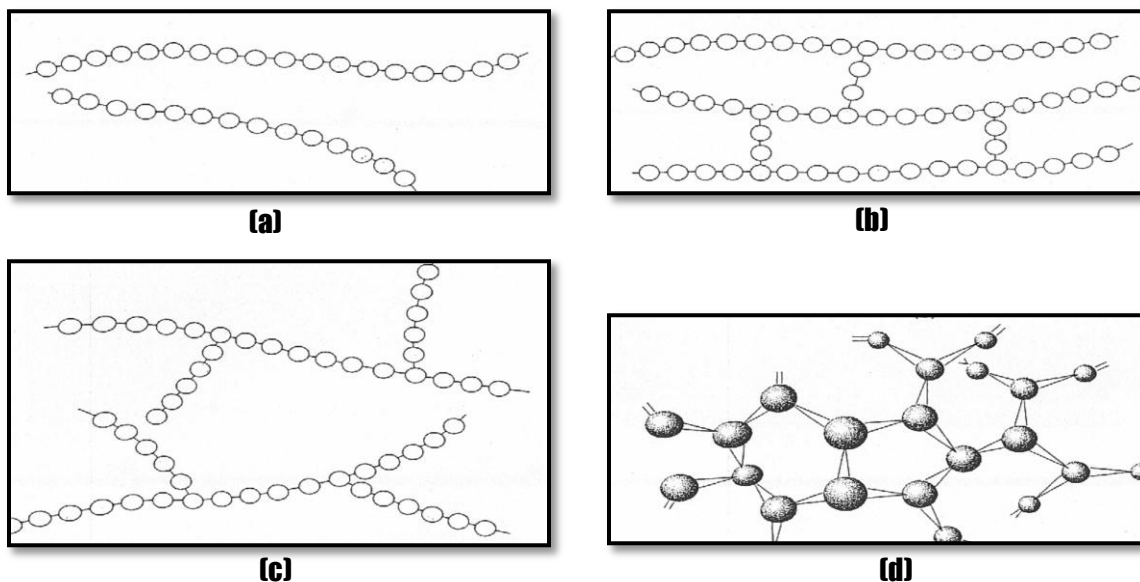


Figura 1.2: Representación esquemática de estructuras moleculares (a) lineal, (b) ramificada (c) entrecruzada y (d) reticulada (tridimensional). Los círculos representan unidades monoméricas. Fuente: [10]

Lineal: En estos las unidades monoméricas se unen unas a otras formando cadenas sencillas. Estas largas cadenas son flexibles y pueden unirse entre sí por fuerzas de van der

Waals. Ejemplo: Polietileno (PE), **Poliestireno (PS)**, Polipropileno (PP), polimetacrilato de metilo (PMMA), Poliamida (PA), etc.

Ramificados: Son polímeros cuya cadena principal está conectada lateralmente con otras cadenas secundarias. Estas ramificaciones son el resultado de las reacciones locales que ocurren durante la síntesis del polímero y disminuye la eficacia del empaquetamiento, obteniéndose por tanto, polímeros de menores densidades.

Entrecruzado: Son retículas con densidad de enlaces cruzados baja, en estos las cadenas lineales adyacentes se unen transversalmente en varias posiciones mediante enlaces covalentes.

En red o reticulados: son retículas con densidad de enlaces cruzados alta, se componen de unidades trifuncionales que tienen tres enlaces covalentes activos, formando redes tridimensionales, en lugar de cadenas lineales generadas por las unidades monoméricas bifuncionales.

Según la propiedad de la tacticidad o regularidad de las cadenas [11]

Polímero isotáctico: corresponde a la configuración cuyos sustituyentes se ubica del mismo lado de la cadena principal del polímero, como en el ejemplo mostrado en la figura 1.3.

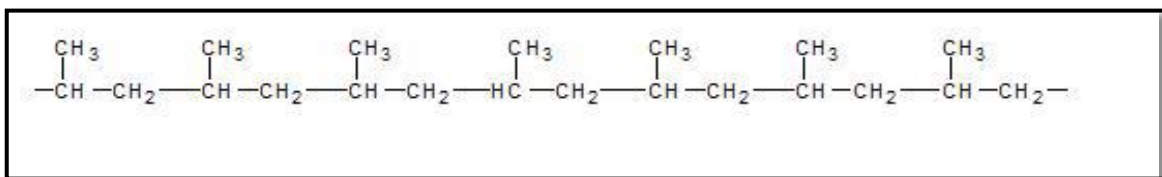


Figura 1.3: Configuración isotáctica del polímero Polipropileno (PP). Fuente: [11]

Polímero sindiotáctico: corresponde a la configuración cuyos sustituyentes se colocan alternativamente a un lado y otro de la cadena principal, como en el ejemplo mostrado en la figura 1.4.

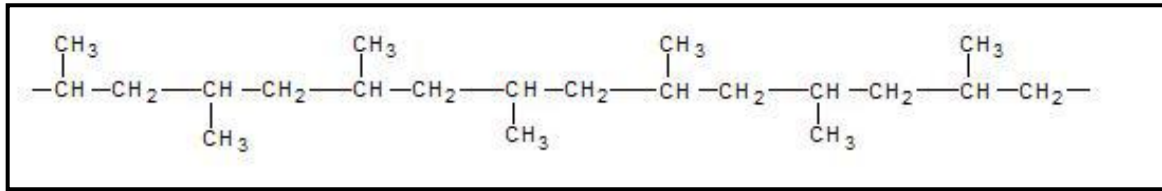


Figura 1.4: Configuración sindiotáctica del Polipropileno (PP). Fuente: [11]

Polímero atáctico: corresponde a la configuración donde la disposición de los sustituyentes en la cadena principal es al azar, como en el ejemplo mostrado en la figura 1.5.

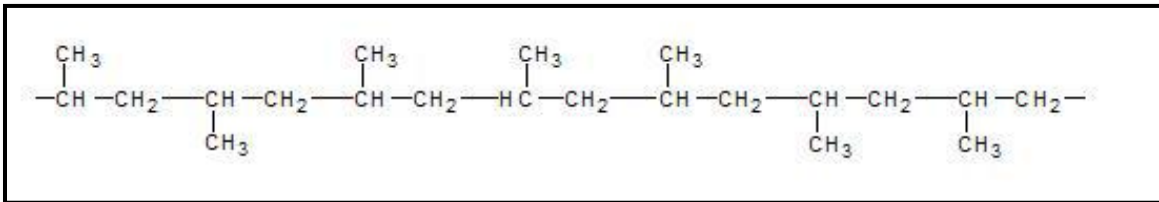


Figura 1.5: Configuración atáctica del Polipropileno (PP). Fuente: [11]

Según su respuesta mecánica frente a la temperatura [12-14]

Termoplásticos: Son polímeros lineales o ramificados, sin reticulaciones. Estos materiales adquieren un estado líquido-viscoso cuando son sometidos al calor; elevando su temperatura por encima de la de ablandamiento (temperatura de fusión T_m para el caso de polímeros semicristalinos y temperatura de transición vítrea T_g para el caso de polímeros amorfos) se les puede dar una forma geométrica que se mantendrá cuando el polímero se enfríe por debajo de aquella temperatura crítica. Es importante recordar que este es un proceso físico reversible. Los termoplásticos constituyen el grupo más importante de los plásticos comerciales, lo que se debe en parte a la facilidad y versatilidad de su transformación. Dentro de este grupo se encuentran las poliolefinas (PE y PP), el PVC, el poliestireno, entre otros. Los termoplásticos se caracterizan por no cristalizar totalmente cuando son enfriados desde el fundido, lo cual significa que tienen un carácter semicristalino, es decir están constituidos por una fase amorfa y otra cristalina, la primera no presentara orden atómico periódico a largo alcance, mientras que la segunda sí presentará tal ordenación.

Termoestables: Son polímeros con moléculas interconectadas que se obtienen mediante la generación de cadenas cruzadas entre moléculas adyacentes del polímero. Estos enlaces son de tipo primario, generalmente covalentes, de elevada energía de disociación (300-500kJ/mol), por lo que estos materiales no pueden fluir con facilidad cuando son calentados, a menos que se alcance su temperatura de descomposición. Algunos de los polímeros termoestables más comunes son los poliésteres, las aminas, los poliuretanos, entre otros.

Elastómeros: También conocidos como cauchos (gomas), son sustancias que al igual que los termoestables poseen cadenas entrecruzadas, aunque en menor proporción, lo que les da mayor movilidad de segmentos de cadena cuando su temperatura está por encima de una temperatura característica (temperatura de transición vítrea T_g). La característica fundamental de los elastómeros es que se deforman rápidamente si se les aplica una fuerza y se recuperan de forma casi instantánea cuando cesa esta acción, obteniéndose deformaciones de hasta 10 veces su longitud inicial. En este grupo se encuentran el polisopreno, el butadieno, el butadieno estireno (caucho BS o SBR), entre otros.

Según el mecanismo de polimerización [14]

Polímeros de adición: Son aquellos que parten de monómeros que poseen al menos un doble enlace. En la polimerización por adición se distinguen tres etapas: iniciación, propagación y terminación. Ejemplo: Polietileno (PE), Poliestireno (PS), Polipropileno (PP) y Polimetacrilato de Metilo (PMMA).

Polímeros de condensación: Se obtienen al reaccionar por etapas dos moléculas simples diferentes. En primera etapa, dichas moléculas reaccionan entre sí para formar otra especie química, eliminándose moléculas sencillas como H_2O , HCl , etc. Ejemplo: Poliamidas, Baquelitas y poliésteres.

1.1.3. Poliestireno

El poliestireno es un polímero termoplástico, compuesto por una cadena de monómeros de estireno, este monómero representado en la figura 1.6, es un líquido transparente de baja viscosidad, se obtiene por reacción del benceno con el etileno dando origen al etilbenceno. Posteriormente se deshidrogena y purifica como se muestra en la figura 1.7. [15-16]

Se procede a la polimerización, comúnmente por adición, donde se busca obtener el polímero mostrado en la figura 1.8. En este tipo de polimerización, las partículas que propagan la cadena de reacciones son radicales libres, cada uno de los cuales se agrega a una molécula de monómero para formar un nuevo radical libre mayor formando moléculas no cristalinas. Los polímeros no tienen un peso molecular determinado. Estos cuerpos son una mezcla de moléculas de pesos distintos. La distribución por peso molecular dentro del poliestireno viene dada por la cantidad N_i de moléculas que hay en la fracción i -ésima.

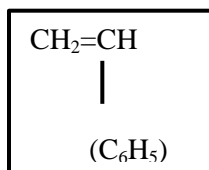


Figura 1.6. Estructura molecular del monómero de estireno.
Fuente: Autora basada en [15-16]

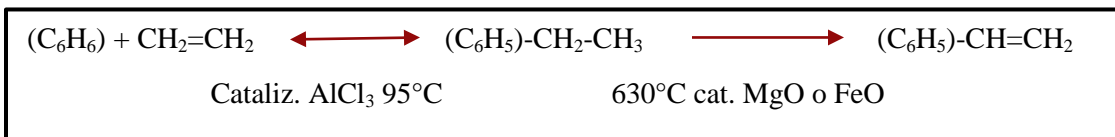


Figura 1.7. Estructura de los procesos reacción del benceno con el etileno dando origen al etilbenceno y su posteriormente deshidrogenación y purificación para obtener estireno.
Fuente: Autora basada en [15-16]

Existen varios métodos para determinar el peso molecular medio de un polímero, uno de ellos es *el peso molecular medio en número* por medio de la ecuación 1.1. [14]

$$\bar{\mu}_N = \frac{\sum_i N_i u_i}{\sum_i N_i} \quad (1.1)$$

Donde:

u_i = peso molecular de la fracción i -ésima y la suma se extiende a todas las fracciones

N_i = cantidad de moléculas que hay en la fracción i-ésima

En la actualidad existen métodos experimentales como la técnica Cromatografía de Exclusión Molecular (GPC, *Gel Permeation Chromatography*), la cual permite determinar la distribución de pesos moleculares, es decir, la proporción en peso w_i de cadenas de cada cantidad de moléculas M_i que forma la mezcla.

Por medio de la polimerización los monómeros adoptan una disposición al formar la cadena, que para el caso del PS es totalmente lineal y su estereoespecificidad es atáctica, es decir no tiene ningún tipo de orden interno que se repita en todas las direcciones del espacio.

En Colombia, industrias dedicadas a la fabricación y comercialización de Poliestireno Expandido (EPS), como AISLAPOR S.A., cuentan con la infraestructura para desarrollar el proceso de polimerización del estireno, pero en la actualidad se prefiere importar la perla de poliestireno expandible proveniente de China, pues, resulta mucho más práctico eliminar un proceso de la cadena productiva, y obtener el material por una diferencia mínima en el costo.

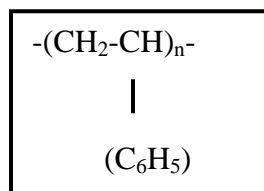


Figura 1.8: Formula química condensada del poliestireno. Fuente: Autora basada en [18]

A continuación en la figura 1.9, se presenta un diagrama que resume el proceso necesario para la elaboración del poliestireno.

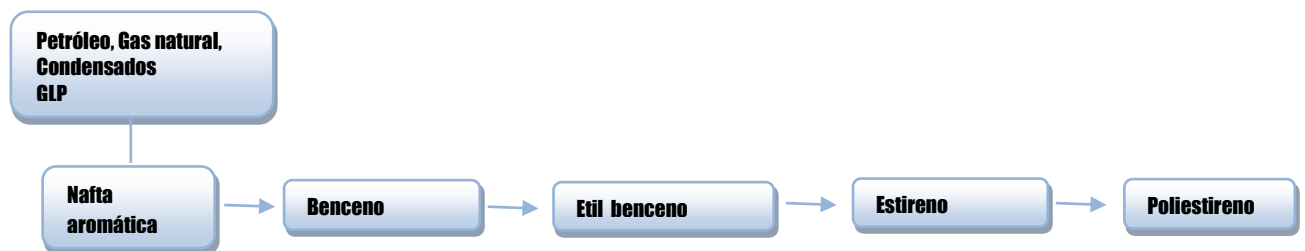


Figura 1.9: Diagrama del proceso para la elaboración del poliestireno. Fuente: Autora basada en [16]

Descripción del proceso para la elaboración del poliestireno

Petróleo: Se formó aproximadamente en algún periodo hace 50 a 500 millones de años. Los aportes de los compuestos de sustancias animales y vegetales quedaron aprisionados bajo las rocas sedimentarias, donde fueron degradadas por microorganismos anaerobios, bajo temperaturas y presiones moderadas. En tales condiciones, la mayor parte del oxígeno y nitrógeno originales se perdieron, mientras que el carbono y el hidrógeno quedaron retenidos. [19]

Es una mezcla viscosa de hidrocarburos alifáticos, aromáticos, olefinas, etc. Es conocido como el oro negro por su gran valor comercial. En la actualidad, “los derivados del petróleo representan en torno al 40% de toda la energía primaria consumida por los seres humanos”. [20]

Para obtenerlo es necesario realizar previamente procesos exploratorios que confirmen la presencia áreas subterráneas con depósitos de hidrocarburos, donde se realizan perforaciones, este proceso se conoce con el nombre de prospecciones petroleras. Luego se procede a la explotación; para ello se debe bajar un cañón, perforar la tubería de revestimiento a la altura de las formaciones donde se encuentra el yacimiento. El petróleo fluye por estos orificios hasta llegar al pozo para finalmente ser extraído por una tubería de producción de menor diámetro.

Se encuentran yacimientos con energía propia que permiten que el crudo salga por sí solo, debido a una presión subterránea generada por elementos que lo acompañan como gas, agua, entre otros. Para este caso se debe instalar en la cabeza del pozo un equipo conocido como árbol de navidad que consta de un conjunto de válvulas para regular el paso del petróleo.

También se encuentran yacimientos sin esta presión, para los cuales se emplean otros métodos de extracción que permitan succionar el petróleo a la superficie.

En cualquiera de los casos el petróleo extraído es separado de los elementos que lo acompañan como sedimentos, agua y/o gas natural, es enviado a los tanques de almacenamiento y a los oleoductos que lo transportan hacia las refinerías o hacia los puertos de exportación.

Nafta aromática [21]: El petróleo líquido es una mezcla compleja de hidrocarburos que deben separarse y purificar antes de su empleo como fuente combustible o fuente de compuestos químicos, por ello se somete a la destilación fraccionada en las refinerías.

El crudo en las refinerías es sometido a un proceso de destilación o separación física y luego a procesos químicos que permiten extraer una gran variedad de compuestos.

Estos compuestos se clasifican en cuatro categorías: parafínico, nafénico, asfáltico o mixto y aromático.

El primer paso de la refinación del petróleo crudo se cumple en las torres de "destilación primaria" o "destilación atmosférica". En su interior, estas torres operan a una presión cercana a la atmosférica y están divididas en numerosos compartimientos a los que se denominan "bandejas" o "platos". Cada bandeja tiene una temperatura diferente y cumple la función de fraccionar los componentes del petróleo.

El crudo llega a estas torres después de pasar por un horno, donde se "cocina" a temperaturas de hasta 400 grados centígrados que lo convierten en vapor. Esos vapores entran por la parte inferior de la torre de destilación y ascienden por entre las bandejas. A medida que suben pierden calor y se enfrían. Cuando cada componente vaporizado encuentra su propia temperatura, se condensa y se deposita en su respectiva bandeja, a la cual están conectados conductos por los que se recogen las distintas corrientes que se separaron en esta etapa.

Al fondo de la torre cae el "crudo reducido", es decir, aquel que no alcanzó a evaporarse en esta primera etapa. Se cumple así el primer paso de la refinación. De abajo hacia arriba se han obtenido, en su orden: gasóleos, ACPM, queroseno, turbosina, nafta y gases ricos en

butano y propano. Algunos de estos, como la turbosina, queroseno y ACPM, son productos ya finales.

Benceno: Las demás corrientes de vapor derivadas del proceso de destilación fraccionada, se envían a otras torres y unidades para someterlas a nuevos procesos, al final de los cuales se obtendrán los demás derivados del petróleo. Así, por ejemplo, la torre de "destilación al vacío" recibe el crudo reducido de la primera etapa y saca gasóleos pesados, bases parafínicas y residuos.

La Unidad de Craqueo Catalítico o Cracking recibe gasóleos y crudos reducidos para producir fundamentalmente gasolina y gas propano. Las unidades de Recuperación de Vapores reciben los gases ricos de las demás plantas y sacan gas combustible, gas propano, propileno y butano.

La planta de mezclas es en últimas la que recibe las distintas corrientes de naftas para obtener la gasolina motor, extra y corriente. La unidad de aromáticos produce a partir de la nafta: tolueno, xilenos, benceno, ciclohexano y otros petroquímicos. La de Parafinas recibe destilados parafínicos y nafténicos para sacar parafinas y bases lubricantes. De todo este proceso también se obtienen azufre y combustóleo. El combustóleo es lo último que sale del petróleo. [21]

Como todos los materiales plásticos el poliestireno expandible se deriva en su última parte del petróleo, aunque hay que tener en cuenta que solo un 7% del petróleo es destinado a la fabricación de productos químicos y plásticos frente a un 93% utilizado para combustibles y calefacción. Partiendo del proceso del gas natural y del petróleo se obtiene como subproductos el etileno y diversos compuestos aromáticos, es de allí de donde obtenemos el estireno.

Etilbenceno [15-16]: En la industria se parte de etileno y benceno, que en presencia de cloruro de aluminio se adicionan según una reacción de Friedel-Crafts, dando Etilbenceno. El etilbenceno, se somete a deshidrogenación en contactos de óxido de zinc a 630° C se transforma en vinil benceno o estírenos. Ver figura 1.7.

El estireno monómero es un líquido que se obtiene en el laboratorio por destilación seca del ácido cinámico. Como subproducto se forma divinilbenceno como se muestra en la figura 1.10, que copolimerizado con estireno da productos reticulados tridimensionalmente, que se usan en resinas intercambiadoras de iones.

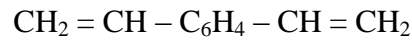


Figura 1.10: Estructura química del subproducto divinilbenceno. Fuente: Autora

Poliestireno [21]: El estireno empieza ya a polimerizar por sí solo a temperatura ambiente, y más rápidamente por el calor, dando una especie de gelatina y, finalmente, una masa dura, transparente e incolora.

En la práctica se polimeriza principalmente por el mecanismo radical, con 0,1 – 0,5 x 100 de peróxido de benzoílo como catalizador. El proceso se lleva a cabo por el método de emulsión, suspensión o en bloque.

Estructura y propiedades [22-23]

Es un polímero lineal, siendo el producto comercial atáctico y por tanto amorfo. Puede producirse poliestireno isotáctico pero ofrece pocas ventajas en sus propiedades, excepto entre la transición vítrea (alrededor de 80°C) y su punto de fusión cristalino (alrededor de 240°C), donde es muy similar a otros plásticos cristalinos.

El poliestireno isotáctico no está disponible comercialmente. Es relativamente inerte químicamente. Es bastante resistente a los álcalis, haluros de ácidos, a los agentes oxidantes y reductores. Puede nitrarse con ácido nítrico fumante y sulfonarse con ácido sulfúrico concentrado a 100°C para dar una resina soluble en agua. El cloro y el bromo se sustituyen tanto en el anillo como en la cadena a temperaturas elevadas. El poliestireno se degrada a temperaturas elevadas a una mezcla de compuesto de bajo peso molecular, siendo aproximadamente la mitad de ellos estireno.

Una vez hecho, el poliestireno es extremadamente fácil de procesar. Su estabilidad y fluidez en condiciones de moldeo inyectado lo hace un polímero ideal para esta técnica.

Sus propiedades ópticas – color, transparencia y similares – son excelentes y su elevado índice de refracción (1,60) lo hace útil para componentes ópticos de plástico. El poliestireno es un buen aislante eléctrico y tiene un factor de pérdida dieléctrica bajo a frecuencias moderadas. Su resistencia a la tracción llega hasta casi 8000 psi.

Es fácilmente atacado por disolventes, incluidos los agentes de limpieza en seco. Su estabilidad al envejecimiento atmosférico es mala; al ser expuesto, se vuelve amarillo y se cuarteo. Dos de sus defectos mayores en propiedades mecánicas son su fragilidad y su relativamente baja temperatura de flexión térmica de 82.88°C, lo que significa que los artículos de poliestireno no pueden ser esterilizados.

Muchos de estos defectos pueden superarse por formulación apropiada o por copolimeración y mezcla. Por ejemplo, la adición de absorbentes de la luz ultravioleta mejora la estabilidad a la luz del poliestireno lo bastante para hacerlo utilizable en instalaciones de iluminación tales como difusores para luz fluorescente. Por medio del uso de aditivos se ha desarrollado poliestireno retardador de la llama.

En la tabla 1.1 se muestran las propiedades típicas del poliestireno, advirtiendo que las propiedades de un plástico dado pueden variar, de acuerdo al mezclado, fabricación, historia térmica y muchas otras variables.

Propiedades	Rango	Observaciones
Tg	85°C a 100°C	Duro
Solubilidad δ	18,6(MJ/m ³) ^{0,5}	Lo disuelven el benceno y el tolueno
Reactivo		Se puede clorar, hidrogenar, nitrar y sulfonar.
Aislante eléctrico		Bueno, aun en condiciones de humedad.
Densidad (kg/m ³)	Nominal: 25 Mínima: 22	
Resistencia a la compresión	1-1,8 daN/cm ² Mínima 0,014 Mpa	
Alargamiento a la rotura	1,2 – 2,5 (%)	
Resistencia al impacto	035 – 0,45 (ft - lb _f /in)	

	Mínima: 1,87-2,4 (J/m)	
Conductividad térmica	0,036 - 0,33 (W/mK)	

Tabla 1.1. Propiedades del Poliestireno. Fuente: Autora [22, 24 -25]

1.1.4. Poliestireno Expandido (EPS)

Es un material aislante celular obtenido de un producto base que se presenta bajo la forma de perlas blancas derivadas de la polimerización de perlas de estireno. Es un termoplástico de baja densidad y alta resistencia mecánica en relación a su reducido peso aparente. Está constituido por un sin número de celdas cerradas, solidariamente apoyadas y termo-soldadas tangencialmente entre sí (cohesión), las cuales contienen aire quieto ocluido en su interior. [26]

La fabricación del poliestireno puede realizarse por moldeo en bloques por vía húmeda (vapor a baja presión) o por producción continua por vía seca.

Descripción del método más empleado para la obtención de EPS. [23 y 27]

Impregnar las perlas de poliestireno expandible (ver figura 1.11), con un 6 por 100 de n-pentano (conocido también como agente porógeno).

Pre - expandir la perlas expandibles en un baño de vapor de agua que oscila entre 80°C y 110°C, la expansión se debe a la volatilización del hidrocarburo que forma celdillas a las que accede también el vapor de agua por un efecto osmótico. De acuerdo a la temperatura y tiempo de exposición del material a la máquina, este disminuye su densidad aparente de unos 630 kg/m³ a densidades determinadas entre los 15 – 30 kg/m³ logrando como resultado perlas de plástico celular con pequeñas celdas cerradas.

Acondicionar las perlas pre-expandidas (ver figura 1.12), dejándolas al aire durante unas veinticuatro horas que el aire entre en la celdillas y compense el vacío creado por la condensación de los vapores en el enfriamiento. Las perlas ya pre expandidas crean un vacío interior el cual es compensado mediante la difusión de aire, gracias a esta acción las

perlas alcanzan un nivel óptimo de estabilización mecánica y llegan a un grado de expansión superior al que ya fueron sometidas, dicha transformación del material durante el reposo resulta ventajoso para procesos posteriores, en esta etapa de reposo, el material pre expandido se lleva a cabo en silos de almacenamiento expuestos a condiciones ambientales al mismo tiempo que las perlas se secan.



Figura 1.11: Perlas de Poliestireno expandible. Fuente: [28]

Moldear con vapor de las perlas pre-expandidas y acondicionadas en un molde agujereado por el fondo, la parte superior y los laterales. Estos moldes son de acero con forma de paralelepípedos, cuyas dimensiones alcanzan 5 m de longitud, 1,50 m de ancho y 0,50 m de espesor.



Figura 1.12. Perlas expandidas. Fuente: [29]

El vapor pasa a través de la masa, expulsa el aire, ablanda las perlas y hace que en el intento de expandirse se comprima entre ellas y contra el molde rígido formando un bloque sólido el cual puede ser cortado en paneles y placas de todos los espesores, ya sea con sierras de cinta o de cuchilla, o por medio de hilos calentados eléctricamente. También

pueden ser moldeadas aplicando vapor de agua por inyección en donde aumentaran gradualmente su tamaño, allí las perlas se unen entre si quedando totalmente adheridas dando forma a diferentes productos tales como termoneveras, esferas, bloques, laminas y diferentes productos para embalajes como se muestra en la figura 1.13 (a)-(e).



Figura 1.13: Aplicaciones de Poliestireno Expandido en Colombia. (a) Construcción (b) Embalaje electrónico (c) Embalaje de alimentos - neveras (d) Cañuelas (e) Geobloques.
Fuente: [30-31]

El agente porógeno, introducido en el momento de la polimerización del poliestireno expansible, provoca en dicha expansión la formación de células minúsculas cerradas llenas de aire (entre 4 y 6 millones de células por decímetro cúbico). El considerable número de estas células confiere a las diferentes calidades de Poliestireno Expandido un coeficiente de conductividad bajo, que de todos modos varía con la densidad del producto final [27].

1.2. Estado del Arte Reciclaje de EPS

Durante el siglo XVIII se dio el descubrimiento de muchas sustancias poliméricas dentro de las cuales se encontraron aceites, alquitranes y residuos no destilables. Estos productos fueron desechados en un principio, pero su estudio contribuyó al conocimiento de la preparación de polímeros individuales y la comprensión del concepto de estructura; permitiendo así, en 1839, llegar a la polimerización del estireno. [32-34]

Sin embargo, fue necesario un siglo de estudios dentro de los cuales se destacaron Staudinger (1928), Carothers (1929, 1931), Flory (1937) y Price (1942), por mencionar algunos, para verificar la hipótesis macromolecular que permitió entender las fórmulas de cadenas largas y polidispersión en los polímeros, en particular para el poliestireno (PS), el caucho y el polioximetileno. [8]

Se descubre entonces el poliestireno, siendo el más antiguo de los termoplásticos, obtenido de la síntesis orgánica entre el etileno y el benceno (hidrocarburos derivados del petróleo) para formar el monómero del estireno que se polimeriza comúnmente por adición. [35]

La polimerización por adición consiste en “una cadena que implica reacciones en cadena en las que el portador de la cadena puede ser un ión o una sustancia con un electrón desapareado llamado radical libre. Un radical libre se forma usualmente por la descomposición de un material relativamente inestable llamado iniciador. El radical libre es capaz de reaccionar para abrir el doble enlace de un monómero y adicionarse a él, quedando un electrón desapareado.” [36]

En la tabla 1.2 se define pues, la configuración del poliestireno.

Base del nombre	Poly(phenylethylene)
Origen	Nafta aromática derivada del petróleo
Nombre trivial	Poliestireno



Monómero	$\text{CH}_2=\text{CH}$ 
Unidad repetitiva	$-\text{CH}_2-\text{CH}-$ 

Tabla 1.2: Configuración del poliestireno. Fuente: Autora basada en [15, 37-39]

Desde entonces el poliestireno comienza a surgir, como uno de los materiales más versátiles del mercado, a tal punto que las industrias estadounidenses relacionadas con materiales poliméricos, al 2004 empleaban a más de la mitad de los ingenieros químicos de su país. [40]

Según el anuario estadístico de la petroquímica en México (2006), China y Medio oriente mantienen la tendencia de crecimiento de esta industria. Para el caso particular de Colombia, según Carlos Garay, presidente de ACOPLASTICOS (Asociación Colombiana de Plásticos), China junto con Perú y Ecuador se han convertido en los principales importadores de plásticos, mostrando un gran acierto en la tendencia descrita por los mexicanos en la tabla 1.3. [32]

El balance al primer trimestre del 2011 en Colombia, muestra un crecimiento del sector significativo. Garay afirma, “en Colombia se procesan alrededor de 910.000 toneladas anuales de las principales resinas plásticas. De los productos nacionales, alrededor de un tercio se destina a la exportación y las dos terceras partes se quedan para atender el mercado interno. Sin embargo, en Colombia el consumo anual de productos plásticos es cercano a 20 kg por habitante, cuando en el primer mundo es de cerca de 100 kg. Esto indica que aún se tiene un gran camino por recorrer. En el primer semestre de 2011, la industria creció alrededor de 6%” [42]

En la actualidad el mercado oferta cuatro líneas de resina de poliestireno [43]:

El PS ultra alto impacto, empleado para aplicaciones que requieren distribuir uniformemente espesores de pared o utilizarlo como sustituto del polímero Acrilonitrilo

Butadieno Estireno (ABS), para piezas automotrices o de juguetería con estructura precisas como las figuras de LEGO®.

El PS alto impacto utilizado para la fabricación de juguetes, espumas estructurales, objetos sometidos a trabajos rudos y en algunos casos, para la elaboración de envases para alimentos a bajas temperaturas sobre 0°C. [44]

El PS Cristal requerido por su transparencia y bajo costo como en las cajas de CD, de huevos, entre otros.

El PS expandible, es un termoplástico celular de baja densidad y alta resistencia físico-mecánica en relación a su reducido peso aparente, sus principales cualidades son excelente aislante térmico – acústico, amortiguación a los impactos, resistencia a la humedad, higiénico, facilidad en su manipulación y apto para cualquier tipo de manualidades.

Según ACOPLASTICO [45], al 2009 el principal sector de consumo de plásticos, es el de empaques y envases para productos alimenticios, productos de higiene y aseo, productos industriales y lubricantes; con un 54% en peso promedio de materias plásticas consumidas.

Para ello se requiere producir el Poliestireno Expandido (EPS), el cual se fabrica a partir de resina de PS expandible, el cual contiene un agente expansor (pentano para inyección o butano para extrusión), formando las perlitas del material (monómero de estireno), para ser almacenadas en silos de reposo y luego moldeadas, aplicando energía térmica para que el pentano se caliente y aumente su volumen. Durante este proceso el material toma la forma de los moldes que lo contienen. [46]

Samper al respecto menciona, “El Poliestireno Expandido (EPS) es un material muy utilizado en el sector de envasado y embalaje debido principalmente a sus excelentes cualidades para la protección contra impactos y sus propiedades de aislamiento térmico, así como por su ligereza y facilidad de conformado que le permite adaptarse a las necesidades de cada producto a proteger. Este producto es utilizado para gran diversidad (alimentación, electrodomésticos, hardware, etc.)”[47]

Norteamérica	Los altos precios del gas natural han provocado una reducción en la competitividad de sus productos. Se espera que esta región permanezca como el principal proveedor de polipropileno y derivados en el futuro.
Europa	Preocupación por la competitividad de sus productos. Europa es la segunda región con mayores costos de producción por los altos precios de los energéticos.
China	China es uno de los principales productores y demandantes de petroquímicos en el mundo. Sus costos de producción fueron casi tan competitivos como los de Medio Oriente.
Medio oriente	La clave de este desarrollo es la producción de gas natural factor importante que permite obtener los más bajos costos de producción de petroquímicos en el mundo, provocando que sus productos sean muy competitivos en cualquier mercado.
Sudamérica	La industria petroquímica en esta región está relacionada directamente con la economía global, la cual ha sido y continuará siendo fuerte.
India	La industria petroquímica en esta región está relacionada directamente con la economía global, la cual ha sido y continuará siendo fuerte.

Tabla 1.3: Desarrollos regionales con impactos globales de la industria petroquímica
Fuente: [41]

Es común ver, en la actualidad, el amplio uso que se le da a los productos elaborados a partir de EPS tanto en bares, cafeterías, restaurantes, fiestas, hoteles, supermercados, aerolíneas, entre otros; puesto que este material es un aislante térmico, propiedad que le permite mantener la temperatura de las comidas ya sean calientes o frías y evita filtraciones.

La necesidad de cuidar el medio ambiente, abre paso a la tendencia de aligeramiento que consiste en sustituir los frascos de vidrio por plástico, abriendo nuevos mercados para la industria de los polímeros. [48]

Es evidente la estrella del PS, sin embargo esta se ve opacada hacia 1987, cuando aparece por primera vez en la lista de sustancias que contenían gases cloro-fluoruro carbonados (CFC's) con la cual se espumaban las resinas. Se detecta que el EPS es una sustancia que contribuye a la destrucción de la capa de ozono, según el Protocolo de Montreal de las Naciones Unidas celebrado en Canadá. [49]

Esto les costó a los fabricantes de productos de EPS la pérdida de clientes. Uno de los más representativos es la franquicia McDonald's; inicialmente la firma anunció que se podrían salvar si los proveedores optaban por producirlas sin usar CFC's. [50]

Los investigadores lograron eliminar el contenido de CFC del Poliestireno Expandido cambiando este agente expansor por butano para el caso de moldeo por extrusión y pentano para el moldeo por inyección [51]. Aun así, hacia 1990, se determinó dar de baja a los envases de PS y se sustituyen por cajas de cartón. McDonald's toma esta decisión, pues los ambientalistas ejercían fuertes críticas a la compañía a causa de la gran cantidad de residuos sólidos generados por los empaques de las hamburguesas y otros productos alimenticios elaborados en PS, que iban a parar a los rellenos sanitarios.

Al respecto Stoner menciona, “La ironía está en que la percepción de los consumidores no se ajustaba a la realidad. En realidad, el plástico solo representaba 8% (del peso) del total de la basura sólida municipal, mientras que el papel representaba 40%. De hecho, los recipientes de la comida rápida apenas representaban 0,5% del volumen total de los rellenos”. [50]

Pensar en el papel como sustituto de EPS, es lo más recurrente, Careaga enuncia, “cambiar el PS por papel, no es mejor, tal vez peor..., pues otros efectos de la decisión puede ser una contaminación mayor de las aguas a partir de los procesos de blanqueo, la erosión del suelo y la desaparición de nutrientes debido a la tala de bosques.” [52]

Castell explica “El plástico en sí mismo no es un residuo especial, por tanto acabada su vida útil, deviene un residuo poco problemático. Lo que sucede con su uso, es que provoca un gran impacto ambiental, en particular de carácter visual.” [53]

Diferentes asociaciones de plásticos a nivel mundial se vieron forzadas a dar a conocer a la opinión pública, cuales son los efectos al medio ambiente, más allá de la lenta degradación y el carácter visual como lo referencia Castell.

Al respecto la Asociación Nacional de Poliestireno Expandido ANAPE de España, afirma, “la combustión en instalaciones de recuperación energética no produce gases dañinos ya que las emisiones se controlan y filtran cuidadosamente. En las modernas plantas de combustión el EPS libera la mayor parte de su contenido energético en forma de otros residuos y emitiendo únicamente dióxido de carbono, vapor de agua y trazas de cenizas no tóxicas”, a su vez reconoce que el vertido en los rellenos sanitarios es el menos aceptable para los residuos de EPS, sin embargo este “no contribuye a la formación de gas metano, ni tampoco supone ningún riesgo por su carácter inerte y estable para las aguas subterráneas” [54].

La Asociación Argentina del Poliestireno Expandido AAPE (2005), reconoce la existencia de emisiones de gases tales como el monóxido de carbono y estireno cuando se realiza quema del EPS sin control, incluso el estireno puede descomponer aún más, despidiendo óxidos de carbono, agua y una cierta cantidad de hollín. Esto a una temperatura por encima de los 230°C para el caso del EPS tipo P (estándar) y de 260°C para el EPS tipo F (con retardante de llama). [55]

Todo esto condujo a estudiar la posibilidad de reciclar el PS como alternativa para mitigar el impacto ambiental con respecto al volumen que ocupa en los rellenos sanitarios y su lenta degradación.

Para este fin se han clasificado en cuatro categorías los métodos de reprocesamiento de EPS, como se muestra en la tabla 1.4.

La aplicación de estas tecnologías para el reciclado de plásticos han permitido en Estados Unidos una reducción de los residuos plásticos en los vertederos, al respecto Subramanian

enuncia “Otro método para el reciclaje de desechos plásticos implica la generación de monómeros y bloques de construcción en alta pureza, a partir de los desechos de plástico, lo que permite la re-fabricación de los plásticos originales o nuevos. Tal reciclaje novedoso (por ejemplo, la glucólisis, amonólisis, pirólisis, etc.) representa un avance tecnológico significativo que podría complementar las técnicas de reciclaje mecánicas existentes. Estos son a menudo llamados reciclaje o alimentación stock, reciclaje avanzado o reciclado químico” [56]. “Se han construido plantas de tamaño comercial para hacer los respectivos monómeros de poliésteres y nylon o están en construcción. Aunque se han desarrollado varias tecnologías en estas áreas, las adopciones a gran escala dependen de su viabilidad económica” [57]

Existen variedad de métodos que permiten ahorrar recursos, prolongando la vida del EPS. Sin embargo, la mayoría de las empresas recicladoras en Colombia, practican la categoría primaria de reciclaje y la categoría secundaria de EPS de embalaje pos consumo, sin abarcar los desechos de la industria alimentaria.

La Contraloría de la república (citado en Pernet, 2011), la composición de residuos sólidos en Colombia es en su mayoría de residuos orgánicos con un 65%, seguida por los plásticos con un 14% [1]. Datos que muestran la necesidad de intervención para un manejo adecuado de estos residuos.

Al respecto Marín menciona, “Empresas del área metropolitana del Valle de Aburrá como FRIGOPOR Y IPOLIEXCO, elaboran productos para la construcción de EPS. Sin embargo, solo reutilizan sus propios residuos o reciben a terceros solo el Icopor limpio.”[58]

Por su parte Reyes y Figueroa (2008), explican una de las principales razones del porque las empresas recicladoras prefieren cooperar con los desperdicios industriales en cuanto a EPS, “el reciclado de los desechos plásticos industriales es homogéneo y su reciclaje no presenta problemas significativos. De cualquier modo, las fábricas de plástico son capaces de reciclar internamente la mayor parte de termoplásticos que producen hasta el punto que pueden estimar que del 10% al 30% de la producción proviene de material reciclado” [4]

CAT.	DEFINICION	MÉTODO
Primaria	Se realiza un proceso de molienda o densificación de los desperdicios industriales y se reincorporan al proceso de fabricación.	Mecánico industrial
Secundario	Es un proceso completo de recuperación de residuos pos consumo, que requiere de clasificación, lavado, reducción de volumen y triturado, de tal manera que se obtenga la granza de partida.	Mecánico pos-consumo.
Terciario	Se busca invertir el proceso de fabricación, rompiendo las cadenas de los polímeros para llegar al monómero. Se usa generalmente para el reciclado de mezclas de distintos polímeros en donde se dificulta el reciclado mecánico.	Pirolisis, hidrogenación, gasificación o tratamiento con disolventes
Cuaternario	Es el llamado reciclado energético. Busca aprovechar el poder calorífico de los polímeros que difícilmente se reciclan mecánica o químicamente. Esta energía es utilizada como combustible.	Incineración controlada

Tabla 1.4: Categorías de reciclado de EPS. Fuente: Autora basada en [47, 51-52 y 59]

La Mantia (2002), reconoce la dificultad de eliminar los aditivos introducidos en el proceso de soplado al PS, convirtiéndose en un problema de volumen a la hora de transportar los residuos a reciclar, además del costo de dicho transporte, el cual no debe superar al de la materia prima para que sea viable el reciclado. [46]

Casado y García (2004), resaltan como en España es bajo el porcentaje de reciclado de PS siendo de un 5%, destacando al polietileno de baja densidad como el plástico con mayor prolongación de vida útil pues presenta un reciclaje de 54%. [60]

Pero, ¿Qué sucede con los residuos pos consumo de los plásticos?

Compromiso empresarial para el reciclaje en Colombia (CEMPRE), explica lo que sucede en el mejor de los casos, “en el país, en particular en Bogotá, es apenas marginal el reciclaje de los plásticos si se compara con las demás familias de materiales empleados en empaques

y envases. De acuerdo con promedios históricos cerca de 16500 toneladas de plásticos por mes van a parar al relleno Sanitario de Doña Juana” [2]

En Colombia en general la disposición final de las basuras se da así, “el 32% de la basura producida recibe una disposición final adecuada en rellenos operados en forma mecánica o manual, haciendo la salvedad que el manejo de los lixiviados es deficiente, lo cual es razón del impacto ambiental que generan. El 15% de los residuos son vertidos en los cuerpos de agua, el 53% son colocados en botaderos a cielo abierto y de estos un 15% son operados con algún grado de técnica (por ejemplo la basura se cubre periódicamente).” [61]

Industry Alliance Packaging (2009) presenta los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de la cuna hasta la tumba, de productos de corta duración elaborados en EPS, tomando como base de estudio 1000 unidades de empaque de EPS para aspiradoras, determinando que el impacto ambiental está dado por emisiones en las categorías de calentamiento global (por CO₂ y CH₄), acidificación (por SO_x, NO_x y NH₃), eutrofización (por SO_x, NO_x y NH₃) y fotoquímica (por C₅H₁₂, CO, CH₄ y HC's). Esta industria Norteamericana va más allá y evalúa alternativas de solución, donde el reciclaje de estos materiales logra reducir de 3 al 14% las emisiones detectadas (exceptuando el aporte de C₅H₁₂). Este con un proceso de producción de circuito cerrado, es decir, donde se utilice material recuperado para luego reciclarlo en el proceso de producción y mezclarlo con material virgen. Para el estudio se consideraron 2 opciones de este tipo de proceso: al 10% de recuperación y al 20% de recuperación. [3]

Además, esta revisión bibliográfica ha permitido identificar esfuerzos a nivel nacional e internacional por generar ingeniería de residuos, a través de las diferentes investigaciones que conducen a la utilización del EPS sometido a algún proceso de recuperación.

En Colombia se encuentra en la base de datos de la Superintendencia de Industria y Comercio la patente “Proceso para la elaboración de paneles para construcción a base de ICOPOR reciclado”. Esta muestra la invención de un proceso que permite la fabricación de paredes, a base de empaques utilizados en la industria alimenticia como bandejas para carne y pollo, portacomidas y vasos. El producto está compuesto de una combinación 70% de la mezcla obtenida del material reciclado y un 30% de cemento aglomerado. [62]

En España, se realiza la reducción y caracterización de residuos de Poliestireno Expandido. La investigación recicla mecánicamente los de embalaje de EPS y determinan experimentalmente que el material no sufre degradación con respecto al material virgen de referencia STYRON™ 678E (PS cristal), por el contrario mostró mejor resistencia a la degradación, inferior temperatura de transición vítrea y capacidad para sustituir o acompañar el PS cristal en procesos de producción. [47]

En México la empresa QUALY PANEL S.A. de C.V. “Desde 1993 se dedica a la producción de paneles estructurales de Poliestireno Expandido para la industria de la construcción principalmente. Aunque desde sus inicios ha combinado el uso de la materia prima virgen con material de empaque usado para producir productos con contenido reciclado, dicho material de empaque ha sido adquirido a empresas recolectoras.” [63]

En este país, también se encuentra un estudio realizado por Marali y Gunther que busca probar la operatividad del proceso fotoquímico para degradar los contaminantes en agua residual proveniente de una planta de producción de poliestireno. Teniendo en cuenta que en materia ambiental esta industria también desarrolla una contaminación en las aguas que puede ser tratada. Los resultados aún requieren de una mayor investigación, pues la fotooxidación no logró degradar completamente los contaminantes del agua. [64]

Subramanian (2000), realizó un estudio sobre la necesidad de los productos a base de resinas plásticas y a su vez la cantidad de residuos sólidos que genera, por ejemplo para el caso del polietileno, al 2000 se contaron 1'990.000 toneladas, y reconoce los avances que se han dado con el fin de mitigar los efectos que estos residuos pueden causar al medio ambiente donde cobra valor la estrategia de las 3R's reducción en la fuente, el reutilizar y el reciclaje. [56]

En 2012, estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia, lograron reproducir muestras de “ICOPOR” biodegradable, a partir del método utilizado por la industria norteamericana Ecotative design. Está obtiene dicho material al mezclar desechos agrícolas como aserrín, hojas de platano, desechos de café, etc., con mycelium (concentrado de células extraído de las raíces de los hongos). Estas células segregan unas enzimas que ayudan a descomponer la materia de los residuos agrícolas creando una consistente red de

filamentos microscópicos, dando como resultado un material aislante, resistente a la humedad, con una temperatura de cambio de fase superior a los 800°C, que se descompone al contacto con el ambiente. [65-67]

Otros investigadores de la Universidad Nacional como Perilla *et al.* (1999), realizaron un primer estudio de las propiedades de residuos de pos consumo de poliestireno de alto impacto. En esta investigación se realizó un reciclado secundario de vasos a base de EPS. Se evaluaron mezclas de material virgen y reciclado, determinando degradación en cuanto al índice de fluidez y la resistencia al impacto de la mezcla. Otras propiedades medidas fueron la elongación, esfuerzo en el punto de fluencia y esfuerzo de ruptura las cuales mostraron poca afectación. [5]

La investigación realizada por Figueroa *et al* (2007) mostró una aplicación original del poliestireno reciclado. Se realizaron mezclas entre asfalto blando, residuos industriales de poliestireno y llanta triturada. Como resultado de esta caracterización se determina que el material obtenido presenta “propiedades ligantes inferiores a las del asfalto sin modificar y menor susceptibilidad térmica”. Sin embargo, al modificar la mezcla con asfalto y 1% de poliestireno se registran buenos resultados, “se evidenció un repunte en la modificación temperaturas mayores, se obtuvo un mejor mezclado entre el modificador y el material convencional dando como resultado valores similares a la muestra sin modificar, es decir, resultados superiores a 150cm donde las probetas no fallaron.” [68]

En Colombia, la industria de la construcción se ha caracterizado por la búsqueda de materiales eco-sostenibles, buscando incorporar a los bloques, residuos sólidos urbanos o industriales.

Los residuos particulados de Poliestireno Expandido junto con lana mineral hicieron parte de los componentes de una mezcla de mortero realizada para la elaboración de paneles. Los investigadores realizan la caracterización con diferentes porcentajes de EPS en las mezclas obteniendo buenos resultados en la combinación 70% de mortero, 20% de fibra de lana mineral y 10% EPS. Mostrando así otra posibilidad de aplicación de este recurso. [70]

González (2005) logran ofrecer “un grupo de 8 propuestas concretas para reciclaje de Poliestireno Expandido (EPS) que consiste en mezclar yeso o escayola y agua para constituir pastas que contienen residuos de EPS que se moldean como placas y paneles para la construcción”. [71]

A nivel industrial, existen en el mundo diferentes empresas que a través de los años promueven diferentes métodos que permitan compensar el impacto medio ambiental por parte del EPS.

En EEUU, la industria DART, introdujo el desecho de EPS, a través del reciclaje mecánico desde el punto de acopio, al ciclo productivo de la empresa. [72]

En este mismo país, la empresa ECOVATIVE DESIGN fabrica empaques con myco-foam, material desarrollado a partir de desechos agrícolas y mycelium como sustituto de EPS en el sector embalaje de electrodomésticos. [67]

En Reino Unido, Tomado Ltd., elimina los contaminantes en plásticos como el PS y ABC. Reciclan 60 Toneladas semanales de PS, transformándolo en ganchos para ropa de PS. [44]

En Austria, Lorenz Schoegl Technik de Pottenstein, a través de un proceso mecánico de tres fases, convierte los residuos de EPS en gránulos finos. Apropriados para la horticultura o como aditivo para la fabricación de ladrillos. [59]

En México, AIMS, realizan el reciclado de desperdicios industriales por medio de fusión. “Esto se hace normalmente por medio de un extrusor, en el cual el material es calentado durante algún tiempo arriba de su temperatura de fusión. El material reciclado puede ser usado directamente en procesos de inyección o extrusión, para la elaboración de otros productos como artículos de escritorio o escolares, etc.” [73]

Las investigaciones aún no dan aplicaciones únicas y determinantes, por el contrario, muestran la necesidad de buscar muchos mecanismos que permitan prolongar el ciclo de vida del EPS, teniendo en cuenta las bondades de las propiedades de este material. Es así, como en esta investigación se pretende medir las propiedades térmicas y mecánicas de muestras de EPS pos consumo, utilizadas en la industria de alimentos y sometidas a un proceso de recuperación para verificar su posible reincorporación en el ciclo productivo y

de esta manera presentar una estrategia que permita mitigar el impacto ambiental asociado con el consumo de EPS y el volumen de residuos generado.

1.3. Propiedades Mecánicas Estudiadas

La caracterización de las propiedades mecánicas del Poliestireno Expandido se especifican definiendo la resistencia del material cuando se somete a esfuerzos compresivos, de flexión e impacto, teniendo en cuenta que este comportamiento depende en gran medida de su estructura química y molecular.

1.3.1. Influencia de los enlaces atómicos en las propiedades mecánicas de EPS [74]

Las propiedades de los plásticos resultan de su propia estructura química y física (cadenas moleculares lineales y ramificadas). La longitud de la cadena, en el caso de los termoplásticos amorfos, es tan larga, que en el momento de formarse se enredan y embrollan entre sí. A pesar que las moléculas filiformes están enlazadas [100], carecen de unión química, lo que permite la transformación por ejemplo por inyección. Las propiedades de los termoplásticos dependen de la estructura química de los eslabones básicos, de la longitud de la cadena, de la cristalinidad y de las fuerzas entre las cadenas moleculares (valencias secundarias), comúnmente fuerzas de Van Der Waals en el caso de plásticos unipolares. En todos los procesos de transformación los enlaces de valencia principal permanecen inalterables, a menos de que ocurra deterioro o descomposición.

El enlace covalente es un enlace direccional, los electrones de enlace se encuentran localizados, aunque los enlaces son más fuertes, los materiales enlazados de esta manera poseen una baja ductilidad, conductividad eléctrica y térmica. Para que se mueva un electrón y pueda transportar corriente, debe moverse el enlace covalente, para ello se requiere altas temperaturas o voltajes.

Los enlaces de Van Der Waals unen moléculas o grupos de átomos mediante una atracción electrostática endeble, esta atracción entre regiones de carga positiva de una molécula y

regiones de carga negativa de otra molécula unen débilmente ambas moléculas. El enlace de Van Der Waals es un enlace secundario que puede modificar de manera notable las propiedades de los materiales. En los polímeros las cadenas individuales se unen unas con otras debido a los enlaces de Van Der Waals, si se rompen estos enlaces las cadenas se pueden deslizar unas respecto a las otras, esta energía se relaciona con su resistencia mecánica.

1.3.2. Resistencia a flexión

El Poliestireno Expandido se considera un material frágil, por lo tanto su comportamiento tensión-deformación se evalúa comúnmente por medio del ensayo de flexión. Puesto que el ensayo de tracción resulta difícil al momento de preparar las probetas con la geometría requerida y también porque existen diferencias significativas bajo cargas de tracción y de compresión.

El ensayo a flexión permite medir la resistencia al material evaluado cuando se le aplica un esfuerzo perpendicular a su eje longitudinal. El material se somete a la acción de la carga, la línea neutra se ira flexionando denominándose flecha a la distancia vertical entre la disposición inicial de dicha línea y las posiciones instantáneas que tome, medida en el lugar de mayor deformación de la muestra de ensayo, como se puede observar en la figura 1.14. [74]

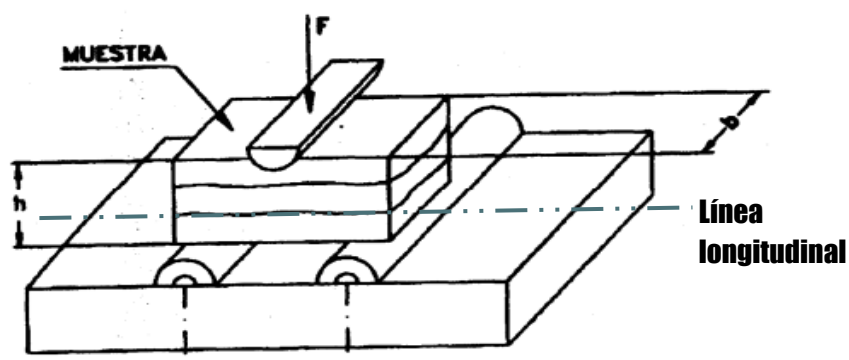


Figura 1.14. Figura de Ensayo de flexión en tres puntos. Fuente: Adaptación de la autora basada en [23]

En el punto de aplicación de la carga, la superficie superior de la muestra se somete a esfuerzos compresivos y a su vez la superficie inferior se somete a esfuerzos de tracción.

Los planos perpendiculares al eje longitudinal, permanecen perpendiculares y planos cuando la viga se somete a flexión. Así los planos AC y BD en la figura 1.15, pueden rotar uno con respecto al otro, pero permanecen perpendiculares al eje longitudinal curvo. Las deformaciones unitarias están relacionadas directamente con las deformaciones totales por lo tanto la deformación unitaria longitudinal E_x varía linealmente con la profundidad de la viga desde un extremo negativo o valor mínimo en CD (ver figura 1.15) hasta un valor positivo máximo en AB (ver figura 1.15), como se indica en la figura 1.16(a).

Las fibras EF (ver figura 1.15), para las cuales la deformación unitaria es cero, están situadas en la llamada superficie neutra de la viga. La intersección de esta superficie neutra con un plano vertical de flexión se llama el eje neutro, es decir, que los únicos esfuerzos producidos por los momentos de flexión M_z que actúan en el plano x- y son los esfuerzos normales, σ_x , debido al efecto de Poisson, las deformaciones unitarias en las direcciones y y z como aparece en la ecuación (1.2).

$$-\frac{v}{E} = \sigma_x \quad (1.2)$$

La superficie neutra se curva en dos direcciones, debido al mismo efecto, suponiéndose curva únicamente en el plano x-y y plana en la dirección z.

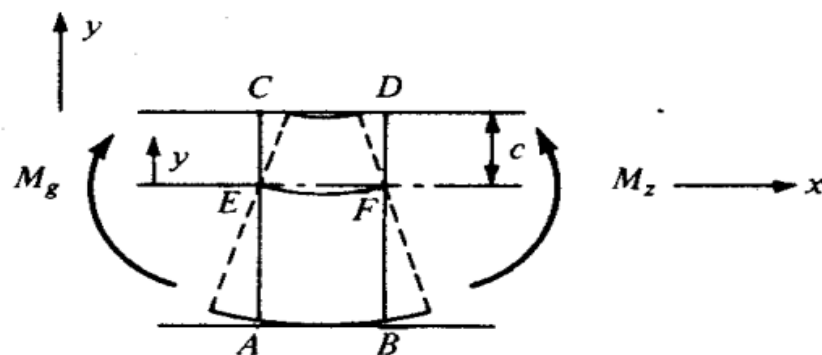


Figura 1.15. Diagrama de esfuerzos compresivos, de tracción y momentos de flexión en una muestra sometida a flexión. Fuente: [28]

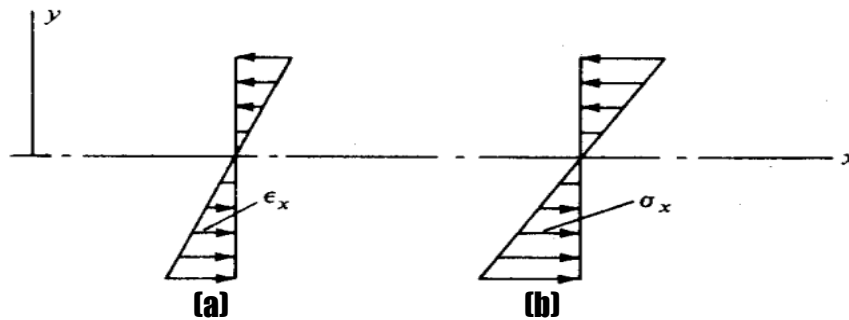


Figura 1.16. Diagrama de esfuerzos y deformación de la muestra sometida a flexión (a) deformación unitaria longitudinal, ϵ_x (b) Esfuerzos normales, σ_x . Fuente: [28]

El material de la viga se comporta linealmente, es decir que los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones unitarias, de acuerdo con la ley de Hooke, esto significa que los esfuerzos normales σ_x varían linealmente con la profundidad de la viga como se muestra en la figura 1.16 (b).

Las suposiciones básicas para flexión pura anteriormente mencionadas no son estrictamente aplicables a los casos en que se presentan corte simultáneamente con la flexión como es el caso del Poliestireno Expandido. Sin embargo, para los elementos clasificados como vigas las deformaciones por corte (no los esfuerzos cortantes) son despreciables comparadas con las producidas por flexión. Únicamente en casos excepcionales tales como las vigas cortas de gran profundidad sometidas a altas cargas de corte, la deformación por corte desempeña un papel significativo.

Con base en lo expuesto anteriormente, una variación lineal de los esfuerzos normales σ_x , se expresa según la ecuación (1.3).

$$\sigma_x = \frac{y}{c} \sigma_{ext} \quad (1.3)$$

En donde:

y = distancia hasta el eje neutro

c = Distancia a la fibra extrema

Momento máximo	Distancia del centro de la probeta a las fibras externas	Momento de inercia de la sección
$M_{max} = \frac{PL}{4}$	$c = \frac{H}{2}$	$I_x = \frac{BH^3}{12}$

Tabla 1.5: Resumen de ecuaciones resistencia a flexión. Fuente: Autora basada en [28]

Si se aplica un momento positivo M_z , las condiciones de equilibrio exigen que en cualquier sección transversal la suma de las fuerzas en la dirección x debe ser igual a cero. Por lo tanto es posible determinar el valor del momento máximo y momento de inercia de la sección como se desarrolla en Apéndice C. Obteniendo los resultados que se resumen en la tabla 1.5.

1.3.3. Resistencia a compresión

Es la capacidad del material para resistir a las fuerzas que intentan comprimirlo. El EPS es un material termoplástico que bajo carga presenta un comportamiento visco-elástico distinto al de los materiales elásticos. Por esta razón se mide la deformación por compresión al 10%, este ensayo, es esencialmente isotrópico, debido a la forma esférica de las celdas que componen al bloque. La densidad, los procesos de fabricación del bloque, la calidad de la materia prima, la temperatura, el grado de deformación influyen en este comportamiento. [75-78]

La resistencia a la compresión es la principal característica mecánica de los bloques de espuma rígida. Depende en primer lugar de la densidad: cuanto más baja sea esta, tanto menor será la resistencia a la compresión. También influyen la forma de las partículas, la temperatura y la edad de la espuma rígida, es preciso que las condiciones de ensayo estén normalizadas como lo especifica la norma ASTM 1621-10.

La edad de la muestra interviene también en los valores del esfuerzo de compresión: Los bloques recientemente fabricados solo poseen un 70 % y al cabo de 24 horas un 90% del valor final que se obtiene a las 4 semanas aproximadamente, en el caso del material virgen. El aumento relativamente fuerte de la resistencia en las primeras 24

horas depende fundamentalmente de la compensación o equilibrado con la presión atmosférica en las partículas, mientras que el aumento posterior se debe a la lenta expulsión del agente de expansión residual. [75-77]

El Poliestireno Expandido cuando es convertido a objeto se ve sometido a esfuerzos sobre su estructura, normalmente la macromolécula se ovilla debido a la capacidad que tienen los átomos que constituyen la cadena de girar alrededor de los enlaces que los une.

Ley de Hooke [75-78]

La ley ideal que explica el comportamiento de los sólidos bajo un esfuerzo se debe a Hooke (1676), que establece que la deformación es proporcional a la fuerza.

E= Modulo de elasticidad o de Young

Rigidez del material o resistencia a la deformación elástica no permanente.

Módulo de elasticidad: es la pendiente de la porción inicial o elástica de la curva Carga-deformación. La pendiente de esta región lineal es el cambio en la carga dividido por el cambio correspondiente en la deformación; en términos matemáticos se expresa según la ecuación (1.4)

$$E = \text{pendiente} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (1.4)$$

Se debe definir el límite elástico como la carga necesaria para producir una determinada deformación plástica. En el límite de la fluencia superior la deformación plástica se inicia con una disminución de la compresión. La deformación prosigue bajo una carga que fluctúa ligeramente alrededor de un valor constante, denominado punto de fluencia inferior. El límite elástico se toma como el promedio de la carga asociada con el límite de fluencia inferior.

Zona lineal

En la gráfica, esta zona representa la capacidad del material para recuperar su forma original al retirar la carga de la pieza y puede ser calculado por la ecuación (1.5).

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.5)$$

Es posible develar el comportamiento a escala atómica de un material al obtener el módulo de elasticidad (E), pues, si aumenta la fuerza del enlace se obtendrá un módulo de elasticidad alto (mayor pendiente), si disminuye la fuerza de enlace disminuirá proporcionalmente el valor del módulo (menor pendiente).

Por lo tanto, se puede caracterizar como dúctil, al material que tiene la capacidad de deformarse sin romperse, mientras que los materiales que fallan completamente al inicio de la deformación plástica son llamados frágiles.

En la figura 1.17 se muestra un material que es sometido a carga por compresión.

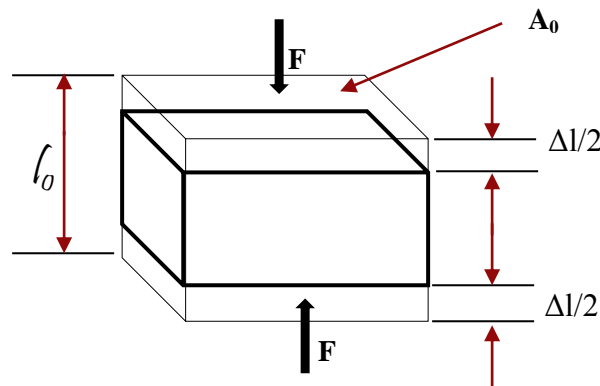


Figura 1.17. Muestra sometida a carga por compresión. Fuente: Autora

Donde:

l_0 = longitud inicial de la muestra

Δl = deformación

F = carga aplicada

A_0 = área inicial de la superficie de la muestra

1.3.4. Resistencia al impacto [75-76]

Los polímeros presentan rotura dúctil o frágil cuando se someten al intervalo de temperatura. Desde luego, la resistencia al impacto decrece gradualmente a altas temperaturas, cuando el polímero empieza a reblandecerse. Ordinariamente, las dos

características relacionadas con el impacto son elevada resistencia al impacto a temperatura ambiente y una temperatura de transición frágil-ductil a temperatura inferior a la ambiental.

1.4. Propiedades Térmicas Estudiadas

1.4.1. Temperatura de Transición Vítrea (Tg)

En los polímeros amorfos corresponde (cuando se calienta) en la transformación de un sólido rígido en un sólido que tiene las características de la goma. La Tg también depende de la estructura de los componentes, la cual influye en la capacidad de las cadenas moleculares para vibrar y rotar a medida que la temperatura aumenta. Probablemente la flexibilidad de las cadenas ejerce la mayor influencia. Cuanto más rígida sea la cadena, la probabilidad de que experimente un movimiento de rotación cuando la temperatura aumenta es menor y, por tanto, el valor de Tg es mayor. [52]

La flexibilidad de las cadenas disminuye cuando se les introducen átomos voluminosos o grandes grupos atómicos que restringen la rotación molecular. Además, el entrecruzamiento o reticulación entre las cadenas también disminuye la movilidad molecular y aumenta la Tg.

Los sólidos amorfos no tienen ningún tipo de orden interno que se repita en todas las direcciones del espacio tal como ocurre con los cristalinos. Las moléculas están tan desordenadas como lo puedan estar en estado líquido, pero, a diferencia de este material, presenta estabilidad dimensional y la mantiene. Al elevar la temperatura el material se ablanda a partir del valor de la transición vítrea, sin eliminar ninguna estructura ordenada.

El estado amorfo es isotrópico (es decir presenta idénticas propiedades independientemente de la dirección en la cual se hace la medición), por lo tanto es posible caracterizarlo al determinar la transición vítrea a la que ocurre el reblandecimiento del material.

Esto, dado que los cambios más importantes de los polímeros amorfos ocurren en la denominada transición vítrea. Por debajo de esta temperatura los movimientos de los segmentos de las cadenas están prácticamente congelados mientras que al llegar a dicha temperatura comienzan los movimientos moleculares de largo alcance, es decir de un

número amplio de segmentos de cadena, teniendo una gran influencia en las propiedades del material y en sus aplicaciones.

La figura 1.18 muestra la dependencia entre T_g y T_m con el peso molecular, pero a pesos moleculares elevados son independientes del peso molecular en la naturaleza del polímero. A temperaturas relativamente elevadas los materiales de bajo peso molecular están en estado líquido fluido; mientras para los de pesos moleculares intermedios y altos prevalecen los estados líquidos viscoso y sólido elástico, respectivamente. Los polímeros cristalinos aparecen a baja temperatura y a pesos moleculares bajos: al aumentar el peso molecular aumenta el carácter amorfo. [14]

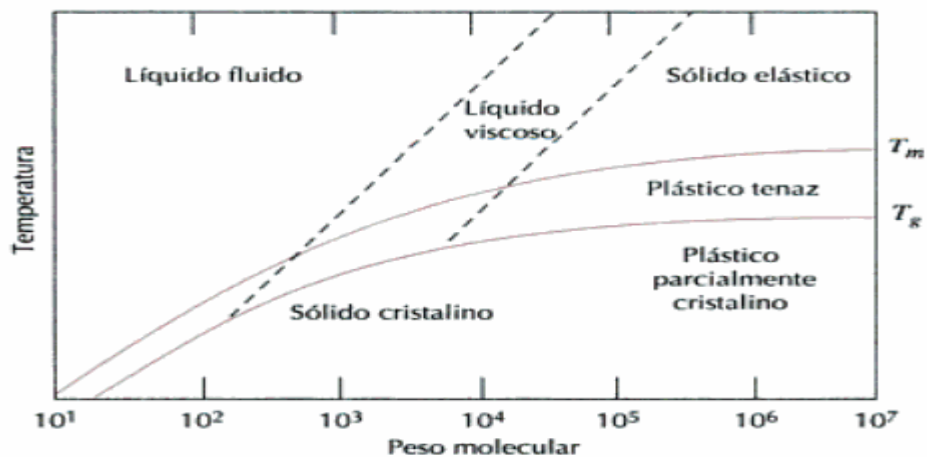


Figura 1.18. Gráfico de la Temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea en función del peso molecular. Fuente: [23]

Por tanto, el conocimiento de la temperatura de transición vítrea permitirá determinar las condiciones de uso para que un material pueda ser termoformado requiere un valor relativamente alto de transición vítrea, que permita una estabilidad dimensional y baja contracción al moldeo.

1.4.2. Calor Específico (C_p)

El calor específico es una propiedad única del material que mide la cantidad de energía que debe ser agregada a una unidad de masa para producir un incremento en la temperatura de dicho material, cuantificando la habilidad del material para almacenar energía térmica. [79]

Esta puede ser ponderada haciendo uso de los resultados obtenidos a través de la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC), en el caso de los materiales amorfos se detectara la transición vítrea, en la figura 1.19 se muestra como esta temperatura se podrá determinar dibujando las tendencias de extrapolación de las líneas vidriosas y líquidas, obtenidas de las tangentes de la línea experimental a dos temperaturas (en los estado líquido y vidrioso) T_1 y T_2 , respectivamente. La intercepción de la línea central (distancia promedio entre las extrapolaciones) con la línea experimental ocurre en T_g (definición del punto central). [80]

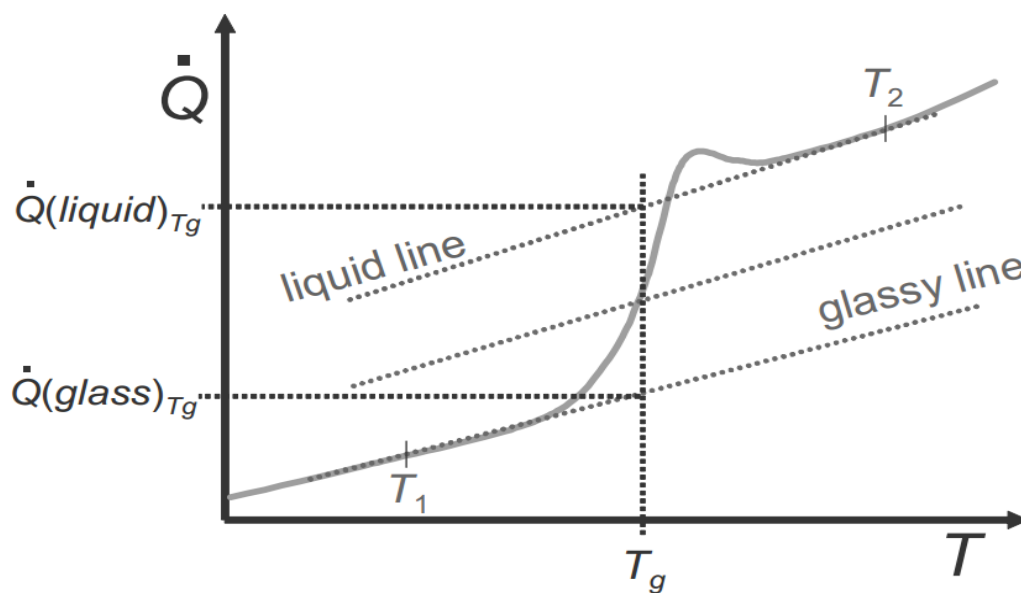


Figura 1.19. Esquema de un trazo de DSC alrededor de T_g . Fuente: [80]

Los valores del flujo de calor de las líneas líquidas y vidriosas extrapoladas en T_g se pueden usar para calcular ΔC_p con la ecuación (1.6).

$$\Delta C_p(T_g) = [Q(\text{líquido})_{T_g} - Q(\text{vidrio})_{T_g}] / (mT) \quad (1.6)$$

Donde:

ΔC_p = Cambio de capacidad de calor de todo el material

$Q(\text{líquido})_{T_g}$ = flujo de calor en la fase elástica a través de T_g

Q (vidrio)_{T_g}= flujo de calor en la fase vidriosa a través de T_g

m = masa total de la muestra

T = Temperatura T_g calculada

1.4.3. Conductividad Térmica (k)

La conductividad térmica es una propiedad de transporte y es una característica del material que mide la capacidad del mismo para extraer energía por unidad de tiempo desde una fuente de calor, cuando éste está en contacto con ella. Ocurre cuando existe un gradiente de temperatura en un material, estableciendo un flujo calor por unidad de área y de tiempo, desde el lado más caliente al más frío, dado por la llamada ley de Fourier; que para un material homogéneo e isotrópico está dado por la ecuación (1.7). El buen conductor extrae del reservorio térmico a alta temperatura más energía por unidad de tiempo que un mal conductor. [11] y [70]

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T \quad (1.7)$$

Donde:

\vec{q} = Flujo de calor por unidad de área (W/m^2), es la velocidad con la que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, es proporcional al gradiente de T ($\vec{\nabla}T$) en esta dirección.

k = Conductividad térmica del material (W/mK), el signo negativo es una consecuencia del hecho que el calor se transfiere en la dirección de la T decreciente.

$\vec{\nabla}T$ = Gradiente de temperatura

1.4.4. Difusividad Térmica (α)

La propiedad de difusividad térmica está asociada con la velocidad de propagación del calor durante cambios de temperatura en el tiempo. El buen difusor alcanza el equilibrio térmico más rápidamente que un mal difusor. [11]

Es posible estimar el valor de la difusividad térmica (α) a partir de la medición de la conductividad térmica (k), el calor específico (C_p) y la densidad del material (ρ), pues estas propiedades se encuentran estrechamente relacionadas por la ecuación (1.8).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1.8)$$

La determinación de la α permitirá conocer la distribución de temperaturas en régimen no estacionario y conocer como fluye el calor por el material, si existen diferencias significativas en cada uno de los materiales estudiados será posible identificar degradación en la propiedad aislante del Poliestireno Expandido con porcentaje de material reciclado comparado con el Poliestireno Expandido virgen. Cuanta más alta es la difusividad térmica de una sustancia, más alto es el ritmo de propagación del perfil de temperatura. Es decir, α relaciona flujo de energía con gradiente de energía.

1.5. Ecuación General de Transmisión de Calor por Conducción en Estado No Estacionario

La ecuación general de transmisión de calor por conducción en estado no estacionario, es una expresión matemática que describe lo que ocurre cuando hay una evolución del campo de temperatura y del proceso de transferencia de calor *en el tiempo*, en una sustancia sólida; mediante la ley de Fourier. Suponiendo que se tiene un volumen de control diferencial de cierto material de longitud dx y área $dydz$ como se muestra en figura 1.20, está sometida a un flujo de energía entrante q_x , y teniendo en cuenta el hecho de que puede generarse energía en el interior del material q_i , debido a reacciones químicas con el sólido que generan calor o el calor generado como consecuencia del paso de una corriente eléctrica a través de una resistencia, entre otros; se realiza el balance de energía expresado en la ecuación (1.9).

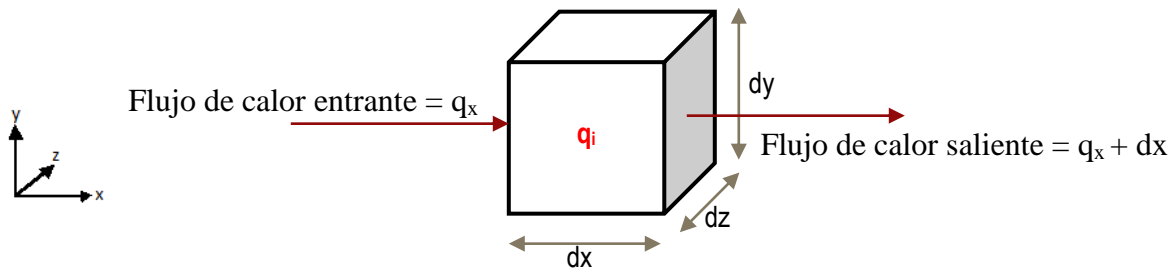


Figura 1.20. Flujo de energía a través de un elemento de longitud dx y sección $dzdy$.

Fuente: Autora

Sí:

Flujo de calor entrante + calor generado – flujo de calor saliente = calor acumulado en el diferencial por unidad de tiempo

Donde:

Flujo de calor entrante = q_x

Calor generado = $q_i \cdot V = q_i \cdot dx dy dz$

Flujo de calor saliente = $q_x + dx$

Calor acumulado en el diferencial por unidad de tiempo = $dm \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt}$, ya que la cantidad de energía que cede o absorbe el elemento, en la unidad de tiempo, es igual al producto de la masa del elemento (dm) por el calor específico (c_p) y por la variación de su temperatura ($\frac{dT}{dt}$)

Entonces se tiene el balance de energía expresado en la ecuación (1.9)

$$q_x + q_i \cdot dx dy dz - (q_x + dx) = dm \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.9)$$

Como la variación de potencia térmica transferida en el eje x es igual al eje y y al eje z , esto debido a su simetría, se expresará dicha variación con el desarrollo de Taylor para el eje x en la ecuación (1.10), más adelante se generalizará el procedimiento para las tres dimensiones.

$$q_x + dx = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx + \frac{d^2 q_x}{dx^2} \frac{(dx)^2}{2!} + \dots$$

Como el valor de la diferencial es muy pequeño tiende a cero, así que la expansión de la suma por Taylor quedaría así:

$$q_x + dx = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx$$

$$q_x + dx - q_x = \frac{dq_x}{dx} dx \quad (1.10)$$

Sí $\rho = \frac{m}{V}$ entonces es posible expresar $\rho = \frac{dm}{dV}$, por lo tanto:

$$dm = \rho dV = \rho dx dy dz \quad (1.11)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.10) y (1.11) en el balance de energía, ecuación (1.9), generalizando el procedimiento para las tres dimensiones se tendría la siguiente expresión:

$$-\frac{dq_x}{dx} dx - \frac{dq_y}{dy} dy - \frac{dq_z}{dz} dz + q_i dx dy dz = \rho dx dy dz \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.12)$$

Teniendo en cuenta la ley de Fourier en la ecuación (1.13), se deriva obteniendo la ecuación (1.14) para el eje x, siendo igual el procedimiento para las tres dimensiones.

$$q_x = -k \cdot dy dz \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1.13)$$

$$\frac{dq_x}{dx} = -k \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} dy dz \quad (1.14)$$

Es necesario multiplicar por dx en ambos lados de la igualdad de la ecuación (1.14), para reemplazar en la ecuación (1.12)

$$k \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} dx dy dz + k \cdot \frac{d^2 T}{dy^2} dx dy dz + k \cdot \frac{d^2 T}{dz^2} dx dy dz + q_i dx dy dz = \rho dx dy dz \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$k \left[\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right] + q_i = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt}$$

Obteniendo la ecuación general de conducción de calor en régimen transitorio (1.15)

$$\frac{k}{\rho \cdot c_p} \left[\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right] + \frac{q_i}{\rho \cdot c_p} = \frac{dT}{dt} \quad (1.15)$$

Esta ecuación (1.16) es la simplificación de la expresión

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q_i}{\rho \cdot c_p} \quad (1.16)$$

Donde α es la difusividad térmica de acuerdo a la ecuación (1.8) explicada en la sección anterior.

1.6. Algunas Técnicas Físicas para el Estudio de Polímeros

1.6.1. Espectroscopia Infrarroja

La espectroscopia infrarroja o molecular consiste en la interacción entre la radiación electromagnética y las moléculas. Existen diferentes naturalezas de interacción, dependiendo de la región del espectro a trabajar y de la energía de radiación utilizada (caracterizada por su longitud o número de onda), ya sea excitación de electrones, vibraciones moleculares y rotaciones moleculares. La molécula absorbe la radiación infrarroja, provocando un cambio en su estado de energía vibracional y rotacional. Para el estudio del espectro infrarrojo (IR) en muestras sólidas y líquidas solo se tiene en cuenta los cambios entre estados de energía vibracional, debido a que las transiciones entre dos estados rotacionales requiere muy poca energía, y tan solo es posible observarlos en muestras gaseosas.

Las características básicas de vibración se clasifican en tensión se pueden observar en la figura 1.21(a-b) y las de flexión en la figura 1.22 (a-d). Los modos de vibración que se pueden producir incluyen cambios en la distancia de enlace (elongaciones o *stretching*, que pueden ser simétrica o antisimétrica) y cambios en el ángulo de enlace, o *bending* (balanceo en plano, tijereteo en plano, aleteo fuera del plano y torsión fuera del plano) [82]



Figura 1.21: Vibraciones de tensión “stretching” (a) Simétrica (b) Antisimétrica.
Fuente:[83]

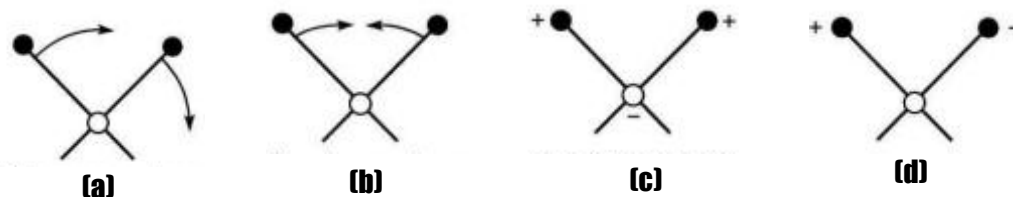


Figura 1.22: Vibraciones de flexión “bending” (a) Balanceo en plano (b) Tijereteo en plano
(c) Aleteo fuera del plano(d) Torsión fuera del plano. Fuente: [83]

Las bandas en el infrarrojo se producen como consecuencia de transiciones entre niveles de energía en los que el número cuántico vibracional (v) cambia en una unidad ($\Delta v = \pm 1$) denominada banda fundamental o en más de una unidad ($\Delta v = \pm 2, \pm 3, \dots$), que se denominan sobretonos [84]; estos últimos tienen una menor intensidad que la banda fundamental. En la práctica solo se observan transiciones v , $2v$ y $3v$, aunque teóricamente sea posible Δv superiores. Se debe tener en cuenta que el espectro puede mostrar bandas como consecuencia de la interacción de dos vibraciones diferentes como se muestra en la ecuación (1.17).

$$v_{comb} = n_1 v_1 \pm n_2 v_2 \pm \dots \quad (1.17)$$

En general una molécula poliatómica, es decir con n átomos, tiene $3n-6$ modos de vibraciones diferentes y si la molécula es lineal cuenta con $3n-5$ modos. Los modos de vibración se representan por una curva de energía potencial diferente, dando lugar a una banda fundamental y a sus correspondientes sobretonos en el infrarrojo.

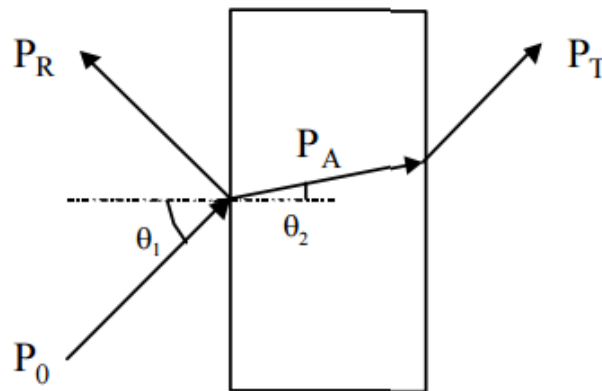
Aunque el espectro infrarrojo se extiende desde 10 a 14300 cm^{-1} , desde un punto de vista funcional se divide en tres zonas como se muestra en la tabla 1.6: IR lejano, donde se producen las absorciones debidas a cambios rotacionales, el IR medio (MIR o simplemente, IR), donde tienen lugar las vibraciones fundamentales y el IR cercano (Near Infrared, NIR),

donde se producen absorciones debidas a sobretonos y combinaciones de las bandas fundamentales [85].

Región	Transición característica	Longitud de onda (nm)	Número de onda (cm ⁻¹)
Infrarrojo cercano (NIR)	Sobretonos y combinaciones	700-2500	14300-4000
Infrarrojo medio (IR)	Vibraciones fundamentales	2500-5x10 ⁴	4000-200
Infrarrojo lejano	Rotaciones	5x10 ⁴ -10 ⁶	200-10

Tabla 1.6: División de espectro IR. Fuente: [85]

Al incidir la radiación sobre la muestra cómo se observa en la figura 1.23, está sufriendo fenómenos de absorción, transmisión y reflexión. La intensidad de la luz transmitida a través de la muestra (P_T) es menor que la intensidad incidente (P_0). Una parte de esta intensidad incidente se ha reflejado (P_R), mientras que otra parte ha sido absorbida por la sustancia (P_A).



$$P_0 = P_A + P_T + P_R$$

Figura 1.23: Fenómenos de absorción, transmisión y reflexión de la radiación electromagnética al interactuar con la materia. Fuente: [85]

La medida más común en el infrarrojo es la que se basa en la absorción (o la intensidad transmitida), a continuación se describe esta técnica que es la utilizada en la presente tesis.

Absorción/Transmisión

El espectro por transmisión a través de la muestra determina P_A , ya que está perdida en la intensidad luminosa incidente está relacionada con la concentración de la muestra. Para calcular la transmitancia se hace uso de la ecuación (1.18) [85].

$$T = \frac{P_T}{P_O} \quad (1.18)$$

Dónde:

T= Transmitancia

P_T = Intensidad de la luz transmitida a través de la muestra

P_O = Intensidad incidente

En cuanto la intensidad de absorción de la luz (A) o absorbancia, se calcula con la ecuación (1.19) [85].

$$A = -\log T = \log \frac{P_T}{P_O} \quad (1.19)$$

A continuación en la tabla 1.7 y 1.8, se presentan algunas de las bandas de absorción correspondientes de grupos orgánicos e inorgánicos respectivamente, utilizadas para la interpretación de los resultados obtenidos por espectroscopia con infrarrojo en la región media.

	Tipo de vibración	Frecuencia (cm⁻¹)	Intensidad	
C-H	Alcanos (tensión o “stretching”)	3000-2850	f	
	-CH ₃ (flexión o “bending”)	1450 y 1375	m	
	-CH ₂ (flexión o “bending”)	1465	m	
	Alquenos (tensión o “stretching”)	3100-3000	m	
	Alquenos	1000-650	f	
	Aromáticos (tensión o “stretching”)	3150-3050	f	
	Aromáticos (“bending” fuera del plano de flexión)	900-690	f	
	Alquino (tensión o “stretching”)	ca. 3300	f	
	Aldehidos		2900-2800	d
			2800-2700	d
C-C	Alquenos	No interpretable		
C=C	Alqueno	1680-1600	m-d	
	Aromáticos	1600 y 1475	m-d	

C≡C	Alquino	2250-2100	m-d
C=C	Aldehído	1740-1720	f
	Cetona	1725-1705	f
	Ácidos carboxílicos	1725-1700	f
	Éster	1750-1730	f
	Amida	1670-1640	f
	Anhídridos	1810-1760	f
	Cloruro ácido	1800	f
C-C	Alcoholes, éteres, ésteres ácidos carboxílicos, anhídridos	1300-1000	f
O-H	Alcoholes, fenoles libre	3650-3600	m
	Alcooles, enlace H	3500-3200	m
	Acidos carboxílicos	3400-2400	m
N-H	Aminas y amidas primarias secundarias (tensión o “stretching”)	3500-3100	m
	Aminas y amidas primarias secundarias (flexión o “bending”)	1640-1550	m-f
C-N	Aminas	1350-1000	m-f
C=C	Iminas y oximas	1690-1640	d-f
C≡N	Nitrilos	2260-2240	m
X=C=Y	Alenos, quetanos, isocianatos, isotiocianatos	2270-1950	m-f
N=O	Nitro (R-NO ₂)	1550 y 1350	f
S-H	Mercaptanos	2550	d
S=O	Sulfóxidos	1050	f
	Sulfones, cloruros de sulfónidos	1375-1300 y	f
	Sulfatos, sulfoamidas	1200-1140	f
C-X	Fluoruro	1400-1000	f
	Cloruro	800-600	f
	Bromuro, ioduro	<667	f

Tabla 1.7: Frecuencias características de grupos orgánicos poliatómicos. f=fuerte, m=medio, d=débil. Fuente: [86]

Grupo	Frecuencia (cm ⁻¹)	Intensidad
(BO ₂)	1300-1350	F
(B ₄ O ₇) ⁻²	975-1000	m
	1050-1080	m
	1330-1370	f
(CO ₃) ⁻²	850-875	m
	1425-1450	f
	2400-2600	f
(HCO ₃) ⁻²	650-665	m
	685-720	m

	820-850	m
	990-015	m
(SCN) ⁻	425-475	2 bandas, a
	750-775	d
	2000-2100	f
(SiO ₃) ⁻²	470-480	f
	560-585	d
	940-1015	f
Silicatos	940-1050	f
(NO ₂) ⁻	830-850	d
	1220-1250	f
	1325-1375	d
(NO ₃) ⁻	800-850	m.a
	1350-1375	f
(NH ₄) ⁺	1390-1440	f
	3050-3350	m
(PO ₄) ⁻²	1000-1050	f
(HPO ₄) ⁻²	830-900	m
	930-980	m
	1010-1080	f
	2200-2440	d
(H ₂ PO ₄) ⁻	900-950	m
	1040-1085	f
(SO ₃) ⁻²	620-670	a
	915-980	f
(SO ₄) ⁻²	585-660	m
	1080-1130	f
(HSO ₄) ⁻²	570-600	f
	850-880	m
	1050-1075	m

Tabla 1.8: Frecuencias características de grupos inorgánicos poliatómicos. f=fuerte, m=medio, d=débil a=agudo. Fuente: [86]

1.6.2. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

El experimento DSC, es una técnica termoanalítica donde la diferencia de calor entre una muestra y un material de referencia se mide como una función de la temperatura. DSC requiere dos células equipadas con termopares, además de un horno programable, grabadora, y controlador de gas.

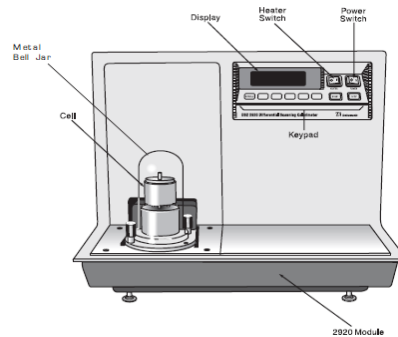


Figura 1.24. Equipo DSC. Fuente: [29]

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC, *Differential Scanning Calorimetry*) permite el estudio de aquellos procesos en los que se produce una variación entálpica, por ejemplo determinación de calores específicos, puntos de ebullición y fusión, pureza de compuestos cristalinos, entalpías de reacción y determinación de otras transiciones de primer y segundo orden.

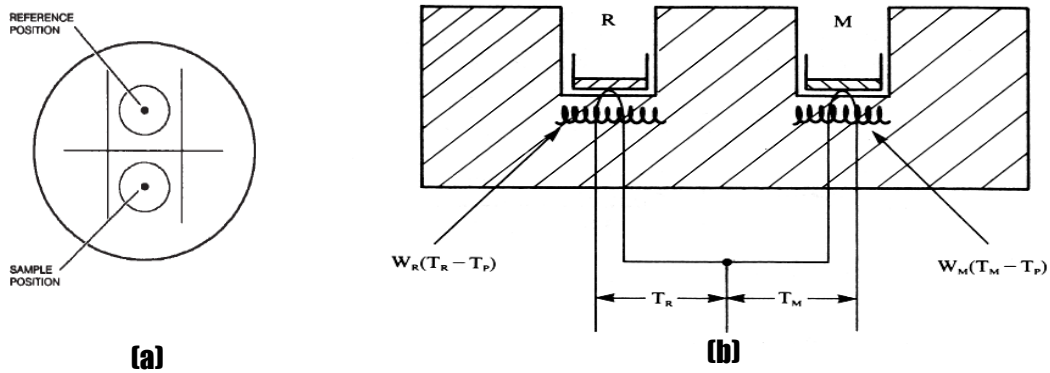


Figura 1.25. Equipo DSC. (a) Celula del DSC donde se ubican la muestra en estudio y el material de calibración (comúnmente Indio). (b) Diagrama de los calentadores individuales, M es la muestra en estudio y R es la muestra de calibración. Fuente: [29 y 75]

El intervalo de temperaturas va desde la temperatura del nitrógeno líquido hasta unos 600 °C. Por esta razón esta técnica de análisis se emplea fundamentalmente para la caracterización de polímeros, pues en este intervalo de temperaturas se evidencian todas las transiciones térmicas de estos materiales, dentro de las cuales es posible determinar la

temperatura de transición vítrea T_g , temperatura de fusión T_m ; se pueden hacer estudios de compatibilidad de polímeros, reacciones de polimerización.

El DSC permite determinar la transición vítrea de un polímero a partir del valor de la temperatura en el punto medio de la inflexión del paso de la línea base. [29]

1.6.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)

En este tipo de análisis se registra en forma continua la masa de una muestra dada, colocada en una atmósfera controlada, en función de la temperatura o del tiempo.

La información proporcionada por un TGA, se obtiene a partir de la pérdida de masa en una muestra, como consecuencia del incremento de temperatura, limitándose en parte a las reacciones de descomposición, oxidación y otros procesos tales como la vaporización, sublimación y la desorción.

La principal aplicación de este método se centra en los polímeros. Los termogramas obtenidos dan información sobre los mecanismos de descomposición de diversas formulaciones poliméricas. Las curvas de degradación térmica (termogramas) son características de cada tipo de polímero, siendo en algunos casos utilizadas para identificar un material polimérico en particular. [11]

1.6.4. Plato Caliente

Este dispositivo permite medir la conductividad térmica de un material en régimen estacionario (es decir, la temperatura cambia con la dirección pero no con el tiempo), consiste de manera general en una fuente caliente constituida por una plato calefactor que comprende una parte central y anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 3mm. Esta fuente caliente está colocada en el centro del equipo. La fuente caliente se alimenta por medio de 4 conductores eléctricos (2 que van a la parte central y 2 que van al anillo de guarda). Estos conductores van conectados a 2 variadores de tensión que permiten una alimentación progresiva de la corriente eléctrica que calienta paulatinamente la placa caliente.

De este circuito eléctrico se medirá permanentemente la tensión y la corriente. En ambos lados de la placa se encuentran 2 placas de material conductor (normalmente cobre) con el objeto de formar una superficie homogénea de transmisión de calor. Luego, a cada lado se encuentra el espacio de aproximadamente 25mm para las probetas de material a experimentar y continua con las planchas que hacen de fuente fría. Como se muestra en la figura 1.26. Estas fuentes frías tienen serpentines por donde circula el agua de la red a efectos de mantener constante la temperatura. En ambas caras de la probeta a ensayar se encuentran termocuplas en número suficiente para registrar permanente las temperaturas de la cara fría y de la cara caliente.

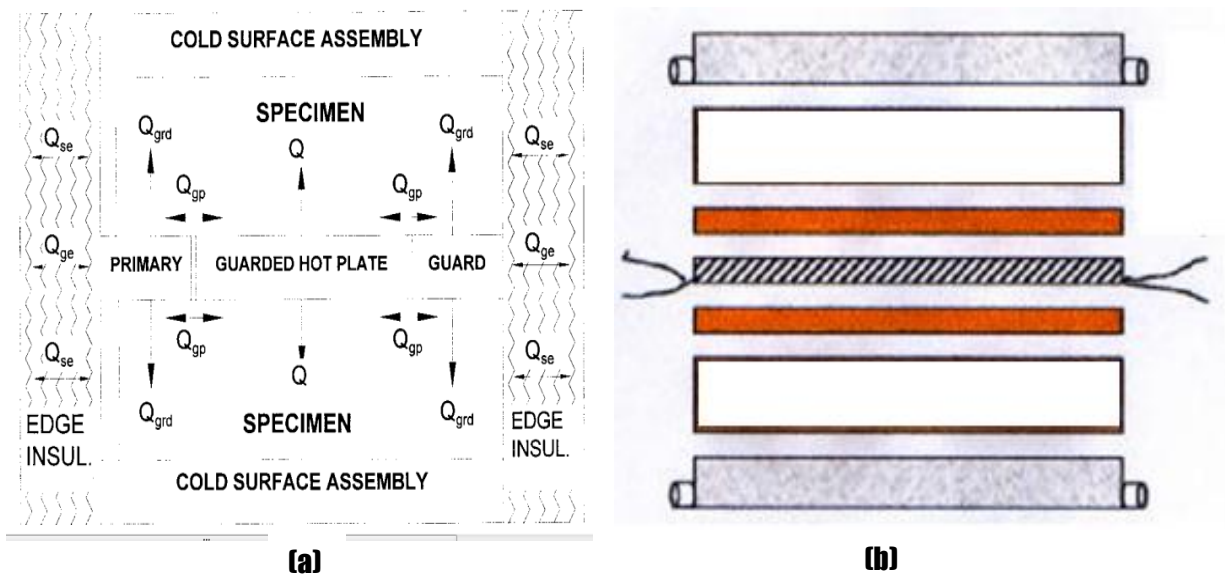


Figura 1.26. (a) Dibujo esquemático del equipo de platos calientes según la norma ASTM C177-10. Fuente: [87] (b) Dibujo pictórico del equipo de platos calientes. Fuente: Autora

Todo el conjunto va rodeado de un material aislante para que no se produzcan fugas de calor al exterior. Se forma así una especie de emparedado horizontal formado por varias capas, donde el calor se produce eléctricamente en el centro y se va transmitiendo hacia ambos lados externos por conducción.

1.6.5. Máquina Universal de Ensayos

Ensayo de compresión.

Este equipo permite realizar ensayo de compresión, este consiste en aplicar una carga a una probeta de forma paralelepípedo, en este caso la muestra se sujeta a una carga aplastante [76]. Para la determinación de la resistencia a la compresión y el módulo de compresión se deben utilizar las ecuaciones (1.20) y (1.21) respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad (1.20)$$

Dónde:

σ : Proporción de la fuerza aplicada a una muestra y el área transversal instantánea de una muestra (esfuerzo)

F: Fuerza aplicada a una muestra

A_i : Área transversal instantánea de una muestra.

Para la determinación del módulo de compresión se aplica la ecuación (1.21).

$$\epsilon = \ln \frac{l_i}{l_o} \quad (1.21)$$

Donde:

ϵ : Proporción de la longitud instantánea en la longitud inicial de la cadena (deformación)

l_i : Longitud instantánea

l_o : Longitud inicial

Este ensayo también permite un examen directo del modo de deformación como se muestra en la figura 1.27.

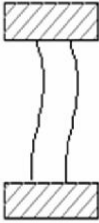


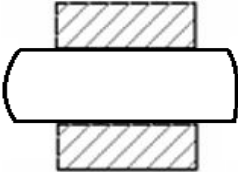


Modo de deformación	Forma resultante	Condición
Curveada		$L/D > 5$
De corte		$2.5 < L/D < 5$
De doble barril		Hay fricción al contacto con la superficie $L/D > 2$
De barril		Hay fricción al contacto con la superficie $L/D < 2$
Compresión homogénea		$L/D < 2$
Inestabilidad de compresión		

Figura 1.27. Resumen de los modos de deformación del ensayo a compresión. Fuente: [76]

1.6.6. Ensayo de impacto Izod sin muesca

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia de plástico a la rotura a la flexión por choque, por la energía extraída del lanzamiento del péndulo tipo martillo,

montados en máquinas estandarizadas, para romper muestras estándar con una oscilación del péndulo que se muestra en la figura 1.28. El resultado de este método de ensayo se expresa como energía absorbida por unidad de espécimen anchura.

Al inicio del ensayo se suelta el martillo y su energía potencial almacenada se transforma en energía cinética en el proceso. Posteriormente el martillo se eleva hacia el otro lado del arco hasta detenerse a una cierta altura final (h_f). Haciendo a un lado la fricción, si el martillo no encuentra resistencia en su camino, las alturas inicial y final serán las mismas.

En principio, la energía de impacto (e_I) de la muestra es la misma que la perdida en la energía potencial entre los estados inicial y final según la ecuación (1.22).

$$e_I = mg (h_o - h_f) \quad (1.22)$$

Donde:

e_I : Energía de impacto

m : Masa del martillo

g : Aceleración de la gravedad

h_o : Altura inicial en la cual se asegura el martillo al péndulo

h_f : Altura final donde se detiene el martillo.

Sin embargo, la prueba de péndulo de impacto indica la energía para romper muestras del tamaño, condiciones de montaje (como se muestra en la figura 1.29) y velocidad de péndulo de impacto especificado según la norma ASTM 4812-11, está energía perdida por el péndulo durante la rotura de la muestra es la suma de las energías requeridas para producir los siguientes resultados:

Para iniciar la fractura de la muestra, propagar la fractura a través de la muestra, tirar del extremo libre (o piezas) o de la muestra rota, doblar la muestra, producir vibración en el brazo del péndulo, producir la vibración o el movimiento horizontal del bastidor de la máquina o de la base, superar la fricción en el péndulo y teniendo el dispositivo indicador, y para superar resistencia aerodinámica (la resistencia del aire del péndulo), deformar plásticamente la muestra en la línea de llegada, y superar la fricción causada por el roce de la nariz llamativa del péndulo sobre la cara de la muestra doblada.

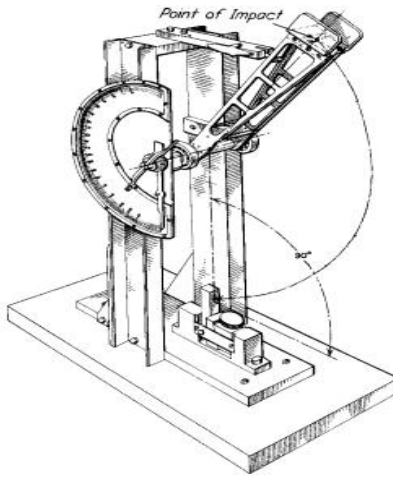
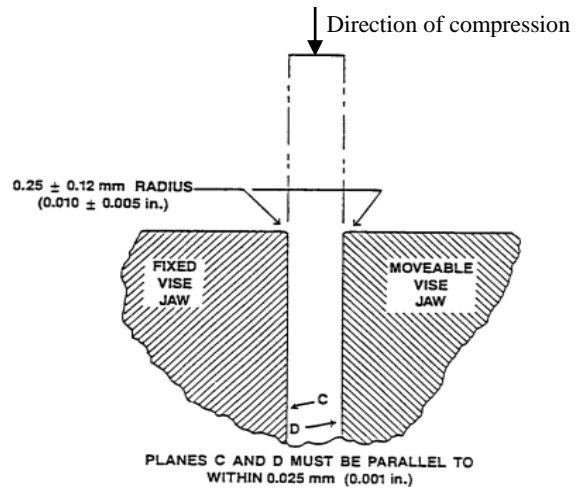


Figura 1.28: Equipo para Ensayo de impacto Izod. Fuente: [88]

Este ensayo se utiliza en materiales relativamente frágiles, donde la fractura de propagación de energía es pequeña en comparación con la iniciación de la fractura.



(a)



(b)

Figura 1.29: Ubicación de la muestra sobre el banco del equipo. (a) Fotografía del Ensayo. Fuente: Autora (b) Grafico según la norma ASTM 4812-11. Fuente: [88].

NORMATIVA AMBIENTAL

2.1. Introducción

En la tabla 2.1 y 2.2, se presenta una síntesis de la normativa vigente respecto al manejo integral de residuos sólidos tanto a nivel nacional como internacional la cual sirve de fundamento legal para el desarrollo de esta tesis, teniendo en cuenta que los residuos de EPS se encuentran contenidos en este grupo de despojos urbanos.

No se encuentran limitantes, por el contrario se hace evidente la pertinencia del desarrollo de esta tesis, pues aporta a los esfuerzos que actualmente se están dando para mitigar el impacto medio ambiental de los desechos plásticos y es posible que contribuya a dar sustento para incluir al EPS pos consumo como material aprovechable al momento de la clasificación los residuos sólidos útiles para reciclar.

2.2. Nacional

Año	Norma	Descripción
1991	Constitución política de Colombia artículo 79, 80 y 95	<p><i>Artículo 79 establece:</i> “todas Las persona tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarla. Es deber del estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”.</p> <p><i>Artículo 80 estipula</i> el deber del estado de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación o sustitución. Es su deber prevenir y controlar los factores de</p>

		deterioro ambiental, imponer las sancione legales y exigir la reparación de los daños causados
		<i>Artículo 95 numeral 8 preceptúa: Es deber de la persona y el ciudadano” proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano”</i>
1993	Ley 99 Art 5	<i>El Congreso de la república crea el Ministerio del Medio ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el SINA, y se dictan otras disposiciones. El sector privado debe ajustar las actividades a las metas del gobierno, por ejemplo reconversión industrial para eliminar o mitigar factores contaminantes o lo que el gobierno de turno proponga. Se descentraliza los programa de eliminación, disposición final y reciclaje de residuos sólidos, dando esta responsabilidad a cada municipio y distrito.</i>
1996	Ley 253	El congreso de la republica aprueba el convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.
1997	Programa de producción más limpia	
1998	Política Nacional para la Gestión de residuos solidos	
1999	Ley 511	El Congreso de la republica establece el 1 de marzo como el día nacional del reciclador y el reciclaje.
2002	Decreto 1713	Presidencia de la república Ministerio de ambiente y Ministerio de Desarrollo Económico, reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos” De esta manera se obliga a los municipios y distritos a elaborar un plan para la gestión integral de residuos (PGIR), además de la necesidad de crear una cultura de la no basura y fomentar el aprovechamiento, ya no se trata de tan solo dejar limpia la ciudad sino de incluir y fomentar el reciclaje. Se tratan propósitos fundamentales dentro del

		<p>aprovechamiento de residuos sólidos: la racionalización del uso y consumo de materias primas. la recuperación de valores económicos y energéticos. la reducción de residuos. Disminución de impactos ambientales.</p>
2003	Decreto 1140	<p><i>El ministerio de ambiente modifica</i> parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con el tema de las unidades de almacenamiento, y se dictan otras disposiciones. Buscan mejorar la disposición de los residuos en el caso de los multiusuarios, de tal manera que se evite la proliferación de insectos, roedores y se generen impactos en la comunidad. <i>Reglamenta</i> la presentación de los residuos sólidos y los recipientes para su almacenamiento de tal manera que no obstruya los pasos peatonales ni vehiculares. <i>Además modifica</i> el artículo 124 de los derechos de los usuarios, de tal manera que estos puedan exigir la prestación de un servicio de calidad</p>
2003	Decreto 1505	<p><i>El ministerio de ambiente modifica</i> parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral y residuos sólidos. Este decreto busca complementar el 1713 del 2002, incluyendo a la población recicladora para que haga parte de los planes de aprovechamiento. El apoyo del municipio y distrito a los proyecto de aprovechamiento esta condicionados a la viabilidad y sostenibilidad de los mismos. <i>Plantea el deber</i> delos usuarios de separar los residuos sólidos en la fuente.</p>
2003	Acuerdo 79	<p><i>El consejo de Bogotá expide</i> el código de policía. En los artículos 83 y 84 se refieren a los residuos, separación y reciclaje. El código pretende que los principios y deberes generales en cuanto al manejo y disposición de los residuos para tener limpia la ciudad hagan parte de la convivencia ciudadana. También hace referencia a la prevención, separación en la fuente y el reciclaje de los residuos y su respectivo aprovechamiento, mencionando algunas medidas correctivas solo en algunos casos.</p>

2003	Resolución 1045	<i>El ministerio de ambiente presenta la metodología para elaborar los PGIRS y se toman otras determinaciones</i>
2004	Decreto 400	<i>La alcaldía de Bogotá impulsa el aprovechamiento eficiente de los residuos sólidos producidos en las entidades del distrito, obligando a cada entidad a diseñar un plan de acción interno que incluya campañas de sensibilización, capacitación, divulgación, dedición de procedimientos para caracterizar los residuos y un sitio de almacenamiento temporal de material orgánico, inorgánico con potencial reciclable, cronogramas, indicadores de gestión, evaluación y control. Se debe propiciar la inclusión de los recicladores</i>
2004	Resolución 132	<i>La unidad administrativa especial de servicios públicos (UESP) Por medio de la cual se adopta el plan de gestión integral de residuos sólidos de Bogotá</i>
2004	Proyecto de acuerdo 250	<i>El consejo de Bogotá regula el sistema operativo de reciclaje (SOR)</i>
2004	Programa proyecto 245	<i>La alcaldía de Bogotá incluye en su plan de desarrollo 2004- 2008 el programa distrital de reciclaje</i>
2005	Decreto 4741	<i>Se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Se incluye la lista de residuos o desechos en el anexo I y II</i>
2006	Decreto 312	<i>La alcaldía de Bogotá adopta el plan maestro de manejo integral de residuos sólidos (PMIRS). Este plan incluye a las personas que generan, reciclan y aprovechan residuos sólidos, de tal manera que la responsabilidad sea compartida entre la comunidad y las empresas de servicio público de aseo. Busca en cuanto lo ambiental y sanitario se refiere entre otros, reducir el volumen de residuos dispuestos y tratados en el relleno sanitario. Reducir las emisiones de gas efecto invernadero y aprovechar los instrumentos de financiación de los mecanismos del protocolo de Kyoto para compensar a la población vecina al rellano sanitario Doña Juana. Es un plan completo que establece diferentes programas y estrategias a cumplir en el corto, mediano y largo plazo. Busca a través de campañas pedagógicas incentivar el rehusó, la disminución de consumo y la separación en la fuente, y a su vez desestimular el uso de materiales no biodegradables o de difícil aprovechamiento.</i>

		Retoma la idea de los parques de reciclaje teniendo como meta dos que funcionen a partir del 2007.
2008	Ley 1259	<i>El congreso de la republica instauro</i> en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores. <i>Restringe la actividad de reciclaje</i> pues según el artículo 6, numerales 6,14 y 15 se sancionara a quien habrá y extraiga material de las bolsas de basura dispuestas en espacio público, además de sancionar también su manejo inadecuado en cuanto su transporte, sitios de clasificación y comercialización.
2008	Ley 1196	<i>Ratifica Colombia la firma del convenio de estocolmo</i>
2008	Proyecto de Acuerdo 263	<i>El concejo de las principales ciudades del país como Bogotá, Medellín y Cali,</i> exponen el proyecto por el cual se crea el programa Ecológico “ Si el planeta queremos cuidar bolsas de tela debemos usar”
2010	Decreto 456	<i>La alcaldía de Bogotá complementa</i> el plan maestro para el manejo integral de residuos sólidos, es decir el decreto distrital 312 de 2006, mediante la adopción de las normas urbanísticas y arquitectónicas para la implantación y regulación de bodegas privadas de reciclaje de residuos sólidos no peligrosos, no afectas al servicio público de aseo, en el distrito capital
2010	Política nacional de producción y consumo sostenible	
2011	Ley 1466	El congreso de la republica adiciona, el inciso 2° del artículo 8° de la ley 1259 del 19 de diciembre del 2008, “por medio de la cual se instauro en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros, y se dicta otras disposiciones
2011	Resolución 829	<i>El secretario distrital de ambiente</i> establece el programa de racionalización, reutilización y reciclaje de bolsas en el Distrito Capital, con el cual se busca la reducción de bolsas de tamaño mayor a 30cm * 30cm, para los sectores de grandes superficies , centros comerciales y comercial
2013	Decreto 2981	<i>El presidente de la república</i> reglamenta la prestación del servicio público de aseo y caracteriza todos sus actores. Establece además la necesidad de que los municipios distritos elaboren, implementen y mantengan

		actualizado un plan de gestión integral de residuos sólidos, PGIRS.
2013	Ley 1672	<i>El congreso de la republica</i> establece los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos electrónicos (RAEE).
2015	Decreto Único Reglamentario 1076	<i>La presidencia de la republica</i> realiza una compilación de normas expedidas por el gobierno nacional en materia ambiental, dentro de las cuales cabe destacar Ley 1333 2009, decreto 3678 de 2010 3n cuanto proceso sancionatorio; decreto 4741 de 2005, decreto 321 de 1999 en cuanto los residuos peligrosos, decreto 1443 en cuanto el plan de gestión de devolución de productos pos consumo.

Tabla 2.1: Normativa ambiental de gestión de residuos sólidos en Colombia y Bogotá D.C.
Fuente: Recopilación Autora

2.3. Internacional

Año	Documento	Descripción
1972	Punto de partida política internacional del medio ambiente	La Organización de Naciones Unidas (ONU) se reúne en la cumbre de la tierra, por primera vez para tratar las problemáticas vivenciadas por los países miembros a causa del crecimiento de la población, el aumento de los desechos, del consumo de recursos renovables y no renovables, la contaminación entre otros. (Estocolmo-Suecia)
1992	Agenda 21 y Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo	La ONU se reúne en la segunda cumbre de la tierra y definen los 40 artículos, en cuatro capítulos, creando una estructura de trabajo con respecto a las políticas ambientales. Es invitada la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), la cual se compromete a crear normas ambientales internacionales (Rio de Janeiro-Brasil)
1992	Convenio de Basilea	La ONU ratifica el documento del convenio sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su disposición y entra en vigencia.
1995	Convenio de Basilea	Se realiza enmienda, las partes tienen la obligación general de garantizar que los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y otros sean minimizados y que cualquier movimiento se lleve a cabo de manera que proteja la salud humana y el medio

		ambiente. Además de estas obligaciones generales, estos movimientos solo pueden darse cumpliendo condiciones y procedimientos.
1996	ISO 14000	Establecen herramientas y sistemas enfocados a los procesos de producción al interior de una empresa u organización, y de los efectos o externalidades que de estos deriven al medio ambiente.
1997	Protocolo de Kioto	Los países industrializados y miembros de la ONU se comprometen a reducir las emisiones reducir en al menos un 5 % en promedio las emisiones contaminantes entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990. Entra en vigencia en febrero del 2005. (Kioto-Japón)
	ISO 14001	La ISO presenta un anexo a la norma ISO 14000 llamada ISO 14.001 Sistema de Administración Ambiental, el cual establece los elementos del Sistema de Gestión Ambiental (SGA), exigido para que las organizaciones determinen un plan de trabajo que les permita mejorar sus prácticas productivas en pro del cuidado del medio ambiente, motivadas a través del logro de su certificación después de pasar una auditoría de un tercero independiente debidamente registrado.
1998	Convenio de Rotterdam	Promueve la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las partes en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños y contribuir a su utilización ambientalmente racional, facilitando el intercambio de información acerca de sus características, estableciendo un proceso nacional de adopción de decisiones sobre su importación exportación y difundiendo esas decisiones a las Partes. En el anexo III se listas los productos químicos.
2001	Convenio de Estocolmo	Sobre Contaminantes orgánicos, fue firmado por Colombia en mayo de 2001. El objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente de la presencia de doce compuestos altamente persistentes en el medio ambiente, denominados Contaminantes Orgánicos Persistentes COPs (dioxinas, furanos, PCB y plaguicidas COP), mediante la adopción de medidas d control para producción, importación, exportación, uso y eliminación de estas sustancias.
2002	Renovación de	Se renuevan los acuerdos de 1992, de tal manera que

	compromiso de políticas de desarrollo sostenible	continúen los esfuerzos en cada país miembro de la ONU sobre los temas de la agenda 21 que permitieran lo que ellos llamaron desarrollo sostenible, teniendo en cuenta que las naciones deben proveerle a las generaciones futuras sustentabilidad. (Rio de Janeiro- Brasil)
2012	Puerta climática de Doha	La 18ª cumbre sobre el cambio climático de las naciones unidas (COP 18) , reafirma los compromisos adquiridos en el protocolo de Kioto hasta el 2020 con el fin de asegurar que el aumento de temperatura global no supere los 2° C . (Doha – Catar)
2013	Convenio de Rotterdam	Se revisa el texto del convenio, realizando enmiendas, donde incluyen azinfos-metilo, éter de pentabromodifenilo, éter de octabromodifenilo comercial, entre otros. Anexo III del Convenio.

Tabla 2.2. Política internacional del medio ambiente. Fuente: Recopilación Autora

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Introducción

Para la caracterización del material fabricado con mezclas entre Poliestireno Expandido virgen (EPS_v) y Poliestireno Expandido reciclado (EPS_r). Se hace necesario establecer como punto de referencia las propiedades del material virgen y luego realizar las mediciones con las diferentes mezclas en estudio con porcentajes en peso de material reciclado de 10,15 y 20%.

Se realizaron espectros infrarrojos tanto para el material de referencia (EPS_0) como para cada una de las muestras en estudio (EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20}), con el fin de detectar la formación de grupos funcionales como consecuencia del proceso de molido y mezcla entre material virgen y reciclado en las proporciones anteriormente descritas.

Para la medición de las propiedades mecánicas de las diferentes formulaciones se utilizaron las técnicas: ensayo de resistencia a compresión, ensayo de resistencia a flexión y ensayo de impacto Izod sin muesca.

Para la medición de las propiedades térmicas de las diferentes formulaciones se utilizaron las técnicas: TGA, DSC y Plato caliente en régimen estacionario.

En la sección 1.6, se presentan cada una de las técnicas de medición aplicadas y en las secciones 3.3, 3.4 y 3.5 están los métodos y la marca de los equipos en los cuales se realizaron los análisis.

3.2. Preparación de formulaciones

3.2.1. Esquema general del trabajo a realizar

La tabla 3.2 muestra la masa en gramos utilizadas en las formulaciones a través del proceso de fabricación de los cuatro materiales. El esquema del proceso de operación se puede observar en la figura 3.1.

Para la identificación de los materiales se utiliza las iniciales del Poliestireno Expandido, es decir EPS, seguido de un subíndice que indica el porcentaje de mezcla de Poliestireno Expandido reciclado como se muestra en la tabla 3.1.

EPS₀	Poliestireno Expandido 100% virgen
EPS₁₀	Mezcla de Poliestireno Expandido 90% virgen y 10% reciclado
EPS₁₅	Mezcla de Poliestireno Expandido 85% virgen y 15% reciclado
EPS₂₀	Mezcla de Poliestireno Expandido 80% virgen y 20% reciclado

Tabla 3.1: Codificación de los materiales fabricados. Fuente: Autora

3.2.2. Preparación de las muestras

En el proceso elaboración de EPS_r se partió de piezas de EPS inyectadas (cajas de ICOPOR multipropósito pos consumo. Ver ficha técnica en apéndice B.1), previamente lavado con detergente industrial y secado al ambiente por un periodo no inferior a 24 horas, este material es triturado en un molino de aspas o destrozador SIEMENS modelo 1LA3 equipado con un tamiz de 10mm, el producto de la molienda se pesa en la balanza industrial PCE-LS con resolución desde 0,001g de acuerdo a las proporciones especificadas en la tabla 3.2 y es impulsado por un ventilador SIEMENS modelo 1LA serie 2044-2 AA a la tolva de homogenización.

MATERIAL	%EPS _v	%EPS _r	MASA EPS _v (g)	MASA EPS _r (g)
EPS ₀	100	0	23000	0
EPS ₁₀	90	10	20700	2300
EPS ₁₅	85	15	19550	3450
EPS ₂₀	80	20	18400	4600

Tabla 3.2: Tabla de masas en gramos utilizada en las formulaciones. Fuente: Autora

El perfil de las partículas del residuo molido (ver figura 3.2) presentes en la muestra es:

Densidad aparente del material: 25 kg/m^3 calculada según norma ASTM D1622-08 previo al molido.

Tamaño de la granza después de molido: $\geq 10\text{mm}$ como se muestra en la figura 3.1



Figura 3.1: Tamaño de la granza de EPS después de molido. Fuente: Autora



Figura 3.2: Residuo molido. Fuente: Autora

En el proceso de fabricación de EPS, se utilizó perla de poliestireno expandible propósito general grado S3 (Ficha técnica ver apéndice B2) producida e importada por la industria Ming Dih de Taiwán suministrada por AISLAPOR (Planta de producción: vereda Canavita, Tocancipá – Colombia), este material se pesa en la balanza industrial PCE-LS con resolución desde 0,001g y se vierte en la expansora 1 (Ver ficha técnica en el apéndice B.3.) de acuerdo a las proporciones especificadas en la tabla 3.2, es impulsado por un ventilador SIEMENS modelo 1LA3 serie 106-2YB60 a la tolva de homogenización y finalmente pasa al silo de almacenamiento por un tiempo mínimo de 2 horas y máximo 24 horas, para evitar pérdida de pentano.

En la figura 3.3 se muestra el diagrama de las operaciones realizadas para la fabricación del material.

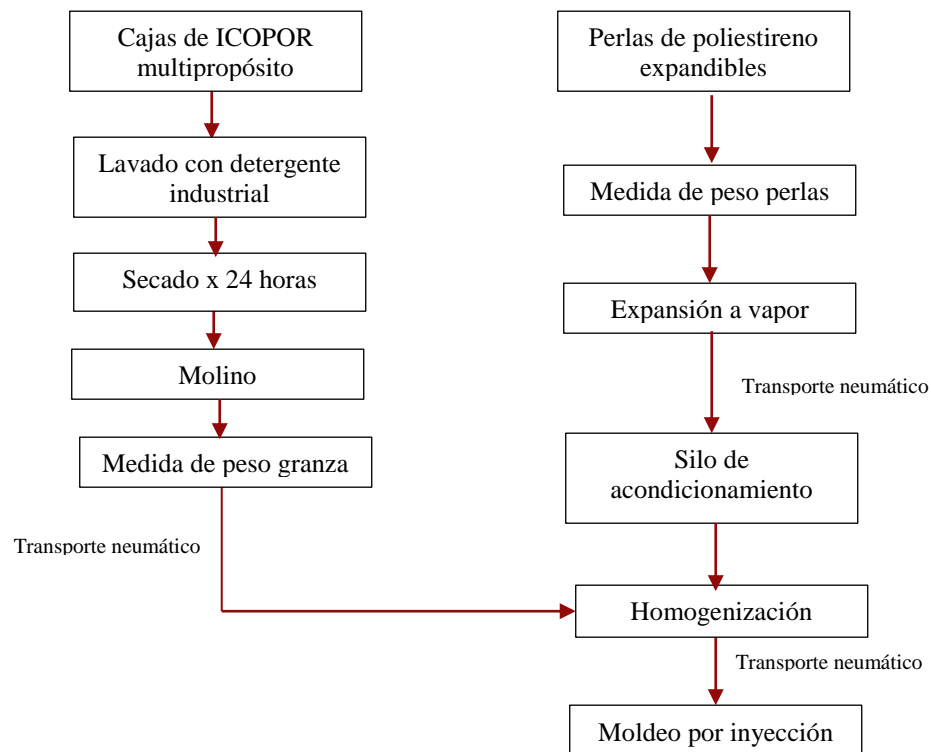


Figura 3.3: Diagrama de bloques de las operaciones realizadas con el material.
Fuente:Autora

Finalmente se vierten las proporciones específicas en la homogenizadora para fabricar cada uno de los materiales y se introduce este manualmente a la tolva de alimentación de la

máquina de inyección LENDLE Modelo LA-90-70-20 (Ver ficha técnica en el apéndice B.4.), con las siguientes condiciones de funcionamiento:

Diámetro de cilindro Neumático de llenado: 120mm

Presión de inyección: 1,5 bar

Velocidad de inyección: 45cm³/s

Potencia de calefacción: 2,2 KW

Molde: Bloque de 1m³

3.3. Métodos de Espectrofotometría de Infrarrojos

La evaluación del grado de modificación del Poliestireno Expandido (EPS), a través de la detección de los grupos funcionales presentes en cada uno de los materiales en estudio, fue determinada mediante la técnica de espectrofotometría de infrarrojo, analizando la aparición de bandas de absorción características del EPS₀ comparado con las obtenidas del EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀.

El equipo utilizado es un espectrofotómetro Shimadzu modelo FTIR S. Este equipo utiliza la transformada de Fourier para el tratamiento de los datos, tiene una resolución del número de onda de 400 a 4000 cm⁻¹.

Las muestras se obtuvieron a partir del raspado por medio de lija P400 silicon carbide waterproof marca CROWNMAN, de cada uno de los materiales, preparando una pastilla en polvo, con una cantidad de 1 mg de la muestra en KBr pesada previamente en una balanza analítica.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Caracterización de Materiales, adscrito al departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

3.4. Métodos para medición de Propiedades Mecánicas

3.4.1. Método para medición de resistencia a compresión

Los ensayos físicos de resistencia a compresión se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMADZU modelo A6-1S. Las probetas cuadradas fueron cortadas del material proveniente de la bloqueadora con las dimensiones 58 x 58 x 44 mm (± 1 mm) de acuerdo a las especificaciones dadas en el numeral 6.1 de la norma ASTM D1621-10, se aplicó la carga sobre la totalidad de la superficie a una tasa de desplazamiento de $2,5 \pm 0,25$ mm/minuto por cada 25,4 mm del espesor, es decir 4,3mm/min, hasta que la muestra es comprimida aproximadamente un 13% de su espesor original o hasta que alcanza el punto de fluencia. Lo primero que ocurra. Los valores obtenidos son el promedio de cinco muestras y se muestran en la tabla 4.1.

Las condiciones de temperatura y humedad fueron $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y $(50 \pm 5)\%$ HR respectivamente.

El ensayo se practicó en el laboratorio de ensayos mecánicos interfacultades de la UNAL sede Bogotá.

3.4.2. Método para medición de resistencia a flexión

La prueba consistió en determinar el valor de rotura máximo de flexo tracción de las placas del material fabricado EPS₀, EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀, de acuerdo a la norma ASTM C203 – 05 a (2012), método de prueba I y procedimiento A, diseñado principalmente para materiales que se rompen relativamente en pequeñas desviaciones.

El ensayo se realizó en la máquina universal de ensayos SHIMADZU modelo A6-1S, los bordes de apoyo fueron cilíndricos con diámetro 32 (± 6 mm) y longitud 100mm (± 2 mm), la separación entre ejes fue de 250 mm (± 1 mm). Las probetas en forma de lámina fueron cortadas del material proveniente de la bloqueadora con las dimensiones 300 x 75 x 22 mm (± 1 mm) de acuerdo a las especificaciones dadas en el numeral 8.2 y 8.3 de la norma en cuestión, las que al momento del ensayo se apoyan en sus extremos.

El ensayo se efectuó sobre las probetas según la dirección longitudinal de la lámina. Se coloca la probeta de forma paralela y centrada con relación al banco de pruebas, provisto con dos apoyos cilíndricos y con una separación entre ejes de 250 mm (± 1 mm). Se aplicó la carga con un rodillo de 33 (± 1 mm) de diámetro y 100 mm de longitud y una velocidad de 4,17mm/min, calculada con la ecuación (3.1), en consecuencia a la norma indicada.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (3.1)$$

Donde:

Z = Tasa de esfuerzo de la fibra exterior (mm / mm.min).

L = Distancia entre apoyos (mm)

d = Espesor de la probeta (mm)

Entonces:

$$R = \frac{(0,01 \text{ mm/mm.min})(250\text{mm})^2}{6(25\text{mm})}$$

$$R = 4,17 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Las probetas se doblan bajo la carga flectora y se rompen por los efectos combinados de compresión y tracción. Los valores obtenidos son promedio de 4 muestras y se muestran en la tabla 4.2.

Las condiciones de temperatura y humedad fueron (23 ± 2)°C y (50 ± 5)% HR respectivamente.

El ensayo se practicó en el laboratorio de ensayos mecánicos interfacultades de la UNAL sede Bogotá.

3.4.3. Método para medición de resistencia al impacto

El ensayo de impacto Izod sin muesca se realizó con el péndulo de impacto marca Physical de 1J. Test solutions. Se utilizaron probetas rectangulares cortadas del material proveniente

de la máquina de inyección con las dimensiones 10,2 x 63,5 x 12,7 mm (± 1 mm) de acuerdo a las especificaciones dadas en el numeral 7 de las normas ASTM D4812-11 y ASTM D7557-09, teniendo en cuenta la dirección de moldeo a compresión como se muestra en la figura 1.29(b).

La prueba consistió en el montaje de la muestra sobre el banco del equipo, está se sujeta por rodamientos antifricción como se muestra en la figura 1.29(a). La muestra se fijó rígidamente en posición tal que su eje largo quedó vertical y en ángulo recto al plano de la parte superior del tornillo de banco.

Se alistó el péndulo de 1J que estaba provisto de un mecanismo de liberación y conectado a un equipo de cómputo que indica la energía de rotura de la muestra. El péndulo, consta de un solo brazo con incidencia en un extremo que concentra gran parte de la masa en la cabeza, sin embargo el brazo es lo suficientemente rígido para mantener las distancias adecuadas y relaciones geométricas entre las partes de la máquina y la muestra para minimizar las pérdidas de vibración que son siempre incluidas en el valor de impacto medido.

El mecanismo de liberación ubica el péndulo a un ángulo de 30° por encima de la horizontal, es accionado a una altura vertical de 20 cm y una velocidad en el momento del impacto de aproximadamente 3,46m/s. El mecanismo fue operado sin impartir aceleraciones o vibraciones, ver figura 1.28.

El equipo determina la energía de rotura por medio de un sistema electrónico que consta de un indicador digital y sensor (encoder). Arroja el dato corregido teniendo en cuenta la fricción de péndulo de soporte, la fricción del puntero, la inercia del puntero, y el efecto del viento en el péndulo. Los valores obtenidos son promedio de 3 muestras y se muestran en la tabla 4.3.

Las condiciones de temperatura y humedad fueron $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 5)\%$ HR respectivamente.

El ensayo se practicó en el laboratorio de ensayos mecánicos interfacultades de la UNAL sede Bogotá.

3.5. Métodos para medición de Propiedades Térmicas

3.5.1. Método para medición de transición vítrea (Tg) y cálculo del calor específico (Cp)

Se realizaron los análisis utilizando la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC), con el equipo DSC 2910 Modulated Instruments (ubicada en el laboratorio de Ingeniería Química UNAL, sede Bogotá) previamente calibrado con un patrón de indio. Se prepararon las muestras en la prensa encapsuladora hermética de aluminio Dupont Instruments PN 900878-901 SN 01678. Todas las medidas fueron realizadas en una atmósfera de nitrógeno con un flujo controlado de 50 ml/min. El único evento determinado al realizar barridos de temperatura con DSC estándar para un rango desde 40 °C hasta 220°C con una cantidad de muestra de $3 \pm 0,5$ mg y una velocidad de calentamiento de 5 °C/min es la temperatura de transición vítrea (Tg) como se muestra en la tabla 4.4. Los cálculos para determinar el calor específico (C_p) se encuentran en apéndice A.4 basado en la sección 1.4.2.

3.5.2. Método para análisis térmico gravimétrico

El análisis térmico gravimétrico se realizó en el equipo Universal V2 5H TA instruments, equipado con un portamuestra de platino, previamente calcinado al rojo vivo para borrar su historia térmica. Todas las medidas fueron realizadas en una atmósfera de nitrógeno con un flujo controlado de 50 ml/min. . Se realizaron barridos de temperatura para un rango desde 30 °C hasta 850°C con una cantidad de muestra de 5 ± 1 mg y una velocidad de calentamiento de 20°C/min.

Se presentan las temperaturas de inicio de la degradación del material determinadas a través de la técnica TGA en la tabla 4.5, determinadas a partir de los termogramas obtenidos y mostrados en la figura 4.1 (a)-(d), donde los datos de porcentaje de masa en las curvas de EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ fueron intencionalmente desplazados 20%, 40% y 60% respectivamente con el fin de mejorar la visualización de los resultados. Más detalles de los termogramas son mostrados en el apéndice B.

3.5.3. Método para la medición de la conductividad térmica y cálculo de la difusividad térmica

La medición de la conductividad térmica se realizó en el equipo plato caliente equipado por termocuplas con 12 puntos de medición, visualizador tipo k, multímetro digital, amperímetro digital, calibrador, flexómetro y fuente variable de voltaje. Este equipo utiliza la técnica de transferencia de calor por conducción en régimen estacionario y permite determinar la conductividad térmica mediante la ecuación (3.2):

$$k = \frac{qxl}{Ax\Delta T} \quad (3.2)$$

Donde:

k = Conductividad térmica (W/mK)

q = Rapidez del flujo de calor a través de la muestra (W)

l = Espesor de la muestra (m)

A = Área de la sección transversal (m²)

ΔT = Diferencia de temperatura a través de la muestra (K)

Debido a que las muestras estudiadas contienen porosidades o celdas vacías en las que el calor se puede transmitir por convección y radiación, además de conducción, k de la ecuación (3.2), es la conductividad térmica aparente de la muestra.

Se utilizaron probetas cuadradas cortadas del material proveniente de la máquina de inyección con las dimensiones 300 x 300 x 24 (\pm 1mm) de acuerdo a las especificaciones dadas por la normas ASTM C177-10 teniendo en cuenta la dirección de moldeo a compresión.

La prueba consistió en el montaje de dos placas sobre el espacio para las muestras en el banco del equipo, este se cierra y se gradúa la temperatura promedio de exposición por debajo de la temperatura de transición vítrea obtenida, para evitar que el material se reblandezca. Los productos de espuma no deben ser expuestos a temperaturas superiores a 79°C (ASTM C447-85-995e-). El plato caliente conformado por el área de medición y la

guarda y el plato frío mantienen las condiciones de frontera de temperatura constante, tanto en la superficie superior como en la inferior de la muestra.

El material permanece expuesto en el equipo hasta alcanzar el estado estacionario, el equipo determina la conductividad térmica (k) por medio de un sistema electrónico descrito al inicio de esta sección. Bajo el supuesto del caso ideal, el flujo de calor es unidimensional a través, de las probetas cuadradas, desde el plato caliente hasta el plato frío en la dirección z (normal a la superficie de los platos). En estas condiciones, el cálculo de la k se realiza a partir del calor que se genera en el área de medición del plato caliente q , las temperaturas de los platos calientes y frío, T_c y T_f , el espesor de la muestra l y el área A . Se presentan en la tabla 4.6 los datos de conductividad térmica y el tiempo de exposición hasta alcanzar el régimen estacionario, obtenidos a través de este ensayo, además se parte de estos datos para determinar la difusividad térmica de acuerdo a la ecuación (1.8) explicada en la sección 1.4.4.

La condición de humedad en el ambiente fue de $(67 \pm 5) \% \text{ HR}$.

El ensayo se practicó en el laboratorio de máquinas y sistemas térmicos de la facultad de minas UNAL. Sede Medellín.

3.5.4. Método para simular el Perfil unidimensional de la temperatura en estado no estacionario, para cada uno de los materiales estudiados

Solución por diferencias finitas de la ecuación diferencial de transferencia de calor a una dimensión para el caso de una pared plana.

Para una placa de conductividad térmica constante y espesor L ver figura 3.4, extendida al infinito en las otras dimensiones de tal manera que el flujo de calor en la región considerada es efectivamente unidimensional, es conveniente tratar el problema en el sistema de coordenadas rectangulares. En el caso general de la temperatura estará cambiando en el tiempo (estado no estacionario) y se supone que no existen fuentes de calor significativas dentro del cuerpo. Se hace necesario expresar la aproximación de una derivada a través de

diferencias finitas, teniendo en cuenta que no se conoce una gráfica de la curva, sino tan solo puntos que describen la transferencia de calor [89].

Para ello se deben determinar puntos en el eje x que corresponderán a la subdivisión del espesor de la placa en estudio. Es decir los diferentes intervalos de distancias donde se tomara una temperatura correspondiente, la cual se graficara en el eje y como se muestra en la figura 3.5.

Por lo tanto se tendrá que la aproximación de la derivada está dada por la ecuación (3.3) o (3.4), tomando tres puntos como se muestra en la figura 3.5.

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{y_{i+1} - y_i}{h} \quad (3.3)$$

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{y_i - y_{i-1}}{h} \quad (3.4)$$

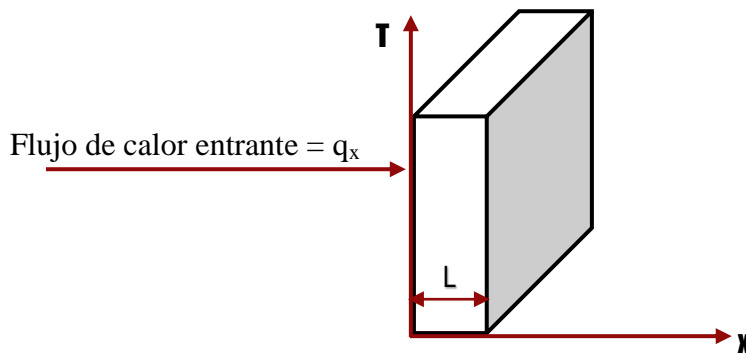


Figura 3.4: Placa de conductividad térmica constante y espesor L, extendida al infinito en las otras dimensiones de tal manera que el flujo de calor en la región considerada es efectivamente unidimensional. Fuente: Autora

Para determinar la segunda derivada se realiza la diferencia entre dos derivadas en un intervalo de distancia h como se muestra en la ecuación (3.5).

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \approx \frac{\frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h}}{h}$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \approx \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} \quad (3.5)$$

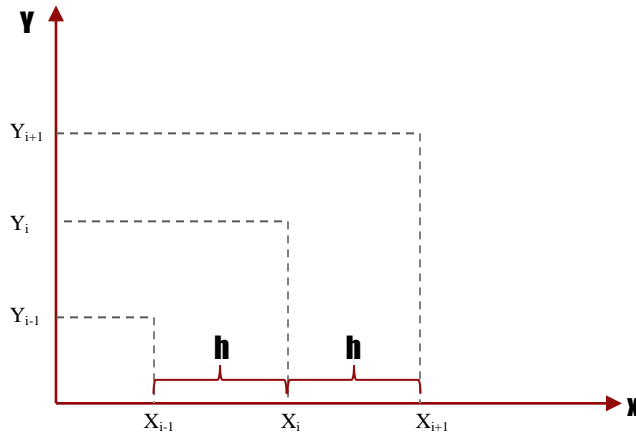


Figura 3.5: Ubicación nominal de puntos que describen la transferencia de calor unidimensional para aproximación de la derivada de un función por diferencias finitas.
Fuente: Autora basada en [76]

Teniendo las aproximaciones en diferencias finitas de la primera y segunda derivada de una función desconocida, se procede a solucionar la ecuación diferencial del calor en una dimensión expresada en la ecuación (1.19) explicada en la sección 1.5. Dando como resultado la expresión de la ecuación (3.6) si se desprecia el calor interno generado.

$$\propto \frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (3.6)$$

Donde:

α = Difusividad térmica o facilidad de dispersión del perfil de temperatura en el material

Para lo cual se tendrá la molécula computacional con su respectiva notación para desarrollar la aproximación de las derivadas por diferencias finitas, mostrada en la figura 3.6.

Entonces las ecuaciones (3.3), en este caso con cambio del tiempo y (3.5) con cambio en la dirección, son reemplazadas en la ecuación (3.6) dando como resultado de las operaciones una relación de recurrencia expresada en la ecuación (3.7). Es decir es posible predecir la temperatura en un momento posterior a partir de información del momento anterior.

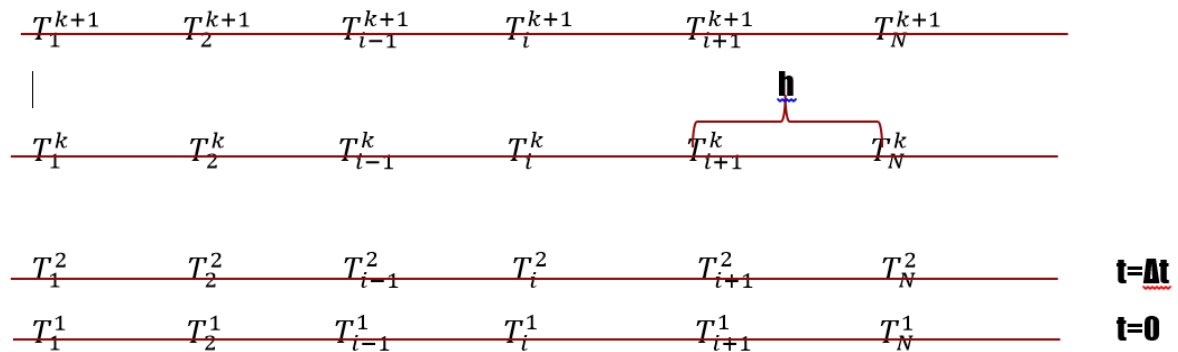


Figura 3.6: Molécula computacional que representa la medición de diferentes temperaturas en eje x de la placa en estudio en diferentes instantes de tiempo con su respectiva notación.
Fuente: Autora basada en [76]

Donde la notación es:

i =Número de nodo

k =Número de instante de tiempo

T =Temperatura

h = subdivisión de distancia entre la una medición de una T y otra T

Se organiza la ecuación (3.6),

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{dT}{dt} = \frac{d^2 f(x)}{dx^2}$$

la ecuación (3.3) con cambio del tiempo y (3.5) con cambio en la dirección son organizadas con la notación explicada en la figura 3.6 y se reemplaza en la ecuación (3.6),

$$\frac{1}{\Delta T} \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta T} = \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{h^2}$$

Se despeja T_i^{k+1} y se tiene como resultado la ecuación (3.7) que será utiliza en el software Octave 3.6.4 como la relación de recurrencia entre las temperaturas con respecto al tiempo y la dirección x expresado con el lenguaje de la ecuación (3.8).

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta T} = \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{h^2}$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = \frac{\alpha \Delta T}{h^2} (T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k)$$

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \left[\frac{\alpha \Delta T}{h^2} (T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k) \right]$$

$$T_i^{k+1} = \boxed{T_i^k} + \frac{\alpha \Delta T}{h^2} T_{i+1}^k \boxed{- \frac{\alpha \Delta T}{h^2} 2T_i^k} + \frac{\alpha \Delta T}{h^2} T_{i-1}^k$$

$$T_i^{k+1} = T_i^k - \frac{\alpha \Delta T}{h^2} 2T_i^k + \frac{\alpha \Delta T}{h^2} T_{i+1}^k + \frac{\alpha \Delta T}{h^2} T_{i-1}^k$$

$$T_i^{k+1} = T_i^k \left(1 - \frac{2 \alpha \Delta T}{h^2} \right) + \frac{\alpha \Delta T}{h^2} T_{i+1}^k + \frac{\alpha \Delta T}{h^2} T_{i-1}^k$$

Sustituyendo $r = \frac{\alpha \Delta T}{h^2}$ se tiene la ecuación (3.7)

$$T_i^{k+1} = T_i^k (1 - 2r) + r T_{i+1}^k + r T_{i-1}^k \quad (3.7)$$

Para Octave 3.6.4, se utilizara el lenguaje expresado en la ecuación (3.8)

$$T_i^{k+1} = T(\text{nodo})(1 - 2 * r) + r * T(\text{nodo} + 1) + r * T(\text{nodo} - 1) \quad (3.8)$$

Para más detalle del código utilizado en Octave 3.6.4 con el fin de obtener los perfiles de Temperaturas en estado no estacionario de los materiales en estudio, se puede consultar el Apéndice C.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Introducción

Este capítulo presenta el análisis de la constitución molecular de cada uno de los materiales en estudio (EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20}) comparado con el material de referencia (EPS_0); a partir de las bandas de absorción características por espectroscopia de infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR).

A continuación se reportan los resultados experimentales de las mediciones de las propiedades mecánicas y térmicas del material virgen (EPS_0) y las mezclas (EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20}). Los resultados de resistencia a compresión, a flexión e impacto, así como los del TGA, DSC, conductividad térmica y la difusividad térmica.

Se presenta la simulación de los perfiles de distribución de temperatura en régimen no estacionario, partiendo de la ecuación de conducción de calor solucionada en la sección 3.5.4.

4.2. Ensayo Espectroscopia Infrarrojo

Se realizó un espectro FTIR a las partículas de polvo de EPS_0 como material de referencia y a las tres mezclas de materiales en estudio (EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20}), con el fin de detectar la presencia de grupos funcionales formados en los procesos degradativos. El resultado de los espectros se muestra en la figura 4.1 donde se aprecian mismas bandas de absorción características para los cuatro materiales estudiados.

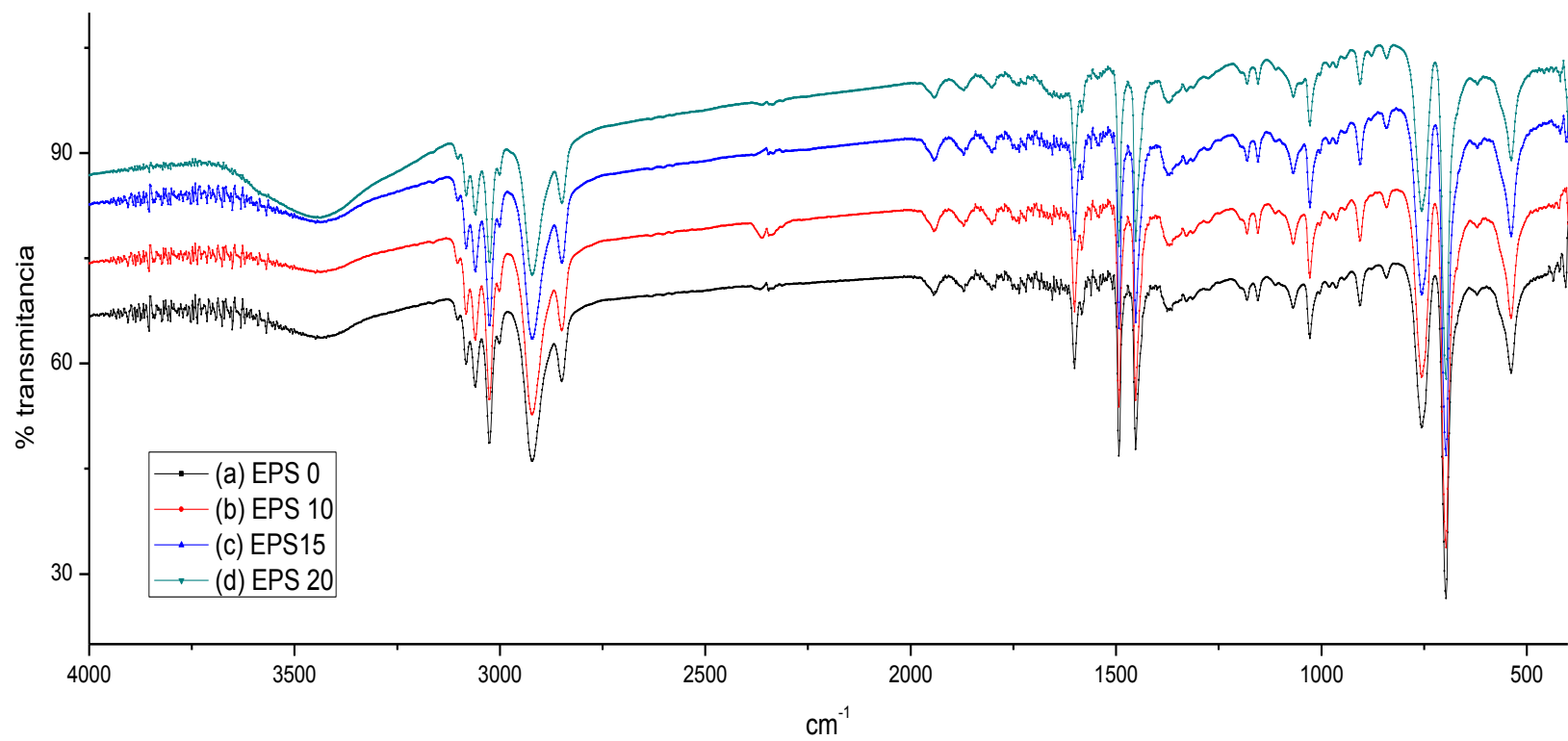


Figura 4.1: Espectro infrarrojo para muestras en polvo de Poliéstireno Expandido: (a) EPS₀, (b) EPS₁₀, (c) EPS₁₅, (d) EPS₂₀.

Fuente: Autora

La superposición de las bandas características, evidencia que los cuatro materiales corresponden al mismo polímero, sin observarse grupos oxigenados formados por los agentes ambientales o algún otro tipo de grupo funcional formado en los procesos degradativos. Se resta el background al espectro para su presentación. Los datos de porcentaje de transmitancia en los espectros de EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ fueron intencionalmente desplazados 10%, 20% y 30% respectivamente con el fin de mejorar la visualización de los resultados.

Como bandas características destacan la banda de absorción a 3088, 3059 y 3030 cm⁻¹ correspondiente a la vibración “stretching” de los enlaces C-H aromáticos. Las bandas de absorción a 2921 y 2848 cm⁻¹ se deben a la vibración asimétrica y simétrica respectivamente, “stretching” C-H de los CH₂ de la cadena central del poliestireno. A 1503 cm⁻¹ aparece la banda de absorción “stretching” del enlace C-C del anillo en el plano. Se observan, las vibraciones “stretching” de los C-H del anillo las cuales corresponden a las bandas 1445 y 1366 cm⁻¹, así mismo, las bandas “bending” de los C-H del anillo en el plano, las cuales se muestran en 1176, 1140, 1067 y 1030 cm⁻¹. Finalmente, las bandas características de vibración “bending” de los C-H del anillo aromático fuera del plano aparecen a 900, 841, 754, 689 y 529 cm⁻¹ como se observa en la tabla 4.1.

Longitud de onda cm ⁻¹	Identificación
3088	C-H aromático vibración “stretching”
3059	C-H aromático vibración “stretching”
3030	C-H aromático vibración “stretching”
2921	C-H del CH ₂ de la cadena principal vibración asimétrica “stretching”
2848	C-H del CH ₂ de la cadena principal vibración simétrica “stretching”
1503	C-C “stretching” del anillo en el plano
1445	C-H “stretching” del anillo en el plano
1366	C-H “stretching” del anillo en el plano
1176	C-H “bending” del anillo en el plano
1140	C-H “bending” del anillo en el plano
1067	C-H “bending” del anillo en el plano
1030	C-H “bending” del anillo en el plano
900	C-H “bending” del anillo aromático fuera del plano
841	C-H “bending” del anillo aromático fuera del plano

754	C-H “bending” del anillo aromático fuera del plano
689	C-H “bending” del anillo aromático fuera del plano
529	C-H “bending” del anillo aromático fuera del plano

Tabla 4.1: Asignación de las bandas de absorción FTIR de los materiales en estudio EPS₀, EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀. Fuente: Autora

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 4.1 se puede observar que tanto el material de referencia EPS₀ como los materiales estudiados EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ corresponden al mismo polímero, sin observarse grupos oxigenados formados por los agentes ambientales o algún otro tipo de grupo funcional formado en los procesos degradativos como el lavado y el molido del material reciclado.

En concordancia con la espectrofotometría obtenido en las investigaciones de López (2004) donde hace uso de PS comercial adecuado para aplicaciones donde se tiene contacto alimentario [74] y Samper et. Al. (2008) el cual utiliza EPS pos consumo utilizado en embalaje de computadores y lo recicla mecánicamente, demostrando que el material no había sufrido una degradación significativa, al menos evidente con el ensayo de IR [47].

En contraste la investigación de Perilla et. Al. (1999) al evaluar las mezclas de EPS virgen y reciclado procedente de vasos desechables pos consumo, identifica que el pico situado en la zona de 1655cm^{-1} , no se hace presente en el material pos consumo que se peletizo en una extrusora monousillo, concluyendo que los dobles enlaces provenientes de la moléculas de butadieno del PS de alto impacto fueron afectados al ser procesado, esto debido a la alta reactividad de los dobles enlaces[5].

4.3. Ensayos Físicos de Resistencia a Compresión

Como se muestra en la tabla 4.2, las tres mezclas de EPS fabricadas, al igual que el material de referencia EPS₀ exhiben bajo carga compresiva un comportamiento muy similar, pues la deformación observada durante el ensayo, fue homogénea y la resistencia a este tipo de esfuerzo permaneció constante en 0,11 MPa con variaciones poco significativas en todos los materiales estudiados.

Sin embargo al comparar el módulo de elasticidad del EPS₀ que corresponde a 2,86 MPa con respecto a los resultados obtenidos de los materiales EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ se presenta una tendencia lineal creciente y a su vez mayor dispersión en los datos. Lo cual indica que a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado en la mezcla se está haciendo más rígido [5]. Teniendo en cuenta que el modulo está estrechamente relacionado con la energía de enlace de los átomos, es posible que la atracción electrostática tienda a una mínima disminución ocasionando que la cadena polimérica pierda flexibilidad [74] afectando otras propiedades mecánicas como la resistencia al impacto y/o la flexión que se estudian en la sección 4.4 y .4.5 de esta investigación.

Material	EPS₀	EPS₁₀	EPS₁₅	EPS₂₀
Propiedad				
Resistencia a la compresión (MPa)	0,11±0,00	0,11±0,00	0,11 ±0,00	0,11±0,00
Módulo de elasticidad (MPa)	2,86 ±0,10	3,38 ±0,96	4,24 ±0,64	3,62 ±0,92

Tabla 4.2: Datos obtenidos del ensayo físico de resistencia a compresión. Todos los datos registrados son los promedios de mediciones obtenidas en 5 muestras de cada material.

Fuente: Autora

4.4. Ensayos Físicos de Resistencia a la Flexión

La tabla 4.3, presenta los resultados del ensayo de flexión, mostrando disminución en los valores de la carga máxima de rotura con respecto al material de referencia EPS₀.

El EPS₁₀ logra acercarse al 68%, el EPS₁₅ al 77% y el EPS₂₀ al 76%, tomando como 100% el valor de carga máxima a la rotura de 68,4 N correspondiente al EPS₀. Por lo tanto, se evidencia mayor fragilidad en el material fabricado. Aunque el EPS₀ se rompe cuando se deforma elásticamente, en los materiales fabricados la carga máxima de rotura es significativamente menor al del material de referencia, es decir, la deformación elástica

sucede más rápido. Se puede decir entonces que la adición de material reciclado al EPS_v hace que esta propiedad se reduzca.

Material	EPS ₀	EPS ₁₀	EPS ₁₅	EPS ₂₀
Propiedad				
Carga máxima de rotura (N)	68,4 ±5,64	46,5 ±4,32	53 ± 5,17	52,1 ±3,28
Desplazamiento máximo (mm)	23,1 ±3,35	23,1 ± ,41	24 ± 7,41	22 ±3,31
Estrés máximo (N/mm ²)	0,5 ± 0,05	0,3 ± 0,05	0,4 ± 0,05	0,4 ± 0,05
Deformación máxima (%)	5,5 ± 0,81	5,7 ± 0,82	5,8 ± 1,78	5,3 ± 0,79

Tabla 4.3. Datos obtenidos del ensayo físico de resistencia a la flexión. Todos los datos registrados son los promedios de mediciones obtenidas en 4 muestras de cada material.

Fuente: Autora

Se pone de manifiesto que al someter el EPS a molido se ocasiona la reducción de la longitud media de las cadenas de PS y de su peso molecular [5y 74]. La presencia de material reciclado, convierte el EPS₁₀, EPS₁₅ y el EPS₂₀, en unos materiales más rígidos y a su vez más frágiles, esto sin depender de la proporción de material reciclado, pues termina siendo una disminución muy similar en los tres casos.

Teniendo en cuenta que el ensayo a flexión combina esfuerzos a compresión y a tracción, se deduce que con la aplicación de fuerzas a tracción al EPS₁₀, EPS₁₅ y el EPS₂₀, se logran vencer más rápido los enlaces entre las cadenas moleculares con respecto al EPS₀, que para el caso de los termoplásticos amorfos ocurre por medio de fuerzas de Van der Waals [74].

4.5. Ensayos Físicos de Resistencia al Impacto Izod sin Muesca

Como se muestra en la tabla 4.4, la resistencia al impacto se encuentra entre los 5,43J/m y los 6,18 J/m, sin observarse una variación significativa de la capacidad del material para soportar un choque a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado y conservando la energía absorbida en el impacto en 0,06 J aproximadamente, esta propiedad se mantiene con respecto al EPS₀ y la falla presentada en los 4 materiales en estudio es una fractura completa, es decir, la muestra se separa en dos piezas. Por lo tanto, el componente rígido en la estructura de los materiales fabricados sigue siendo bajo para afectar esta propiedad mecánica.

Estos resultados explican ausencia de efectos significativos en las mezclas de EPS_v y EPS_r que provoquen formación de fases o estructuras intermedias que afecten las características de los componentes de partida [5].

Material	EPS₀	EPS₁₀	EPS₁₅	EPS₂₀
Propiedad				
Energía absorbida en el impacto (J)	0,06± 0,00	0,06± 0,01	0,05±0,00	0,06± 0,00
Resistencia al impacto (J/m)	5,43±0,21	6,03± 0,95	5,43± 0,21	6,18± 0,39

Tabla 4.4. Datos obtenidos del ensayo físico de resistencia al impacto. Todos los datos registrados son los promedios de mediciones obtenidas en 3 muestras de cada material.

Fuente: Autora

4.6. Técnica Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La tabla 4.5 muestra los resultados del barrido de temperatura desde 40°C hasta 220°C donde el único evento determinado es la temperatura de transición vítrea (T_g) en todos los materiales producidos. Es posible caracterizar la estructura de los materiales fabricados en un estado sólido amorfo, en concordancia con el material de referencia EPS₀.

Material	EPS₀	EPS₁₀	EPS₁₅	EPS₂₀
Propiedad				
Temperatura de transición vítrea (°C)	101,4	96,5	97,1	104,5
Calor específico C _p (KJ/Kg.K)	0,5	0,5	0,6	0,9

Tabla 4.5. Resultados de temperatura de transición vítrea y calor específico obtenidos a través de la técnica DSC. Fuente: Autora

Se tiene reblandecimiento del material EPS₁₀ a 96,5 °C con una diferencia de -4,9 °C con respecto al EPS₀, en el caso del EPS₁₅ se obtiene a 97,1°C con una diferencia de -4,3°C comparado con el EPS₀ y para el EPS₂₀ los movimientos moleculares ocurren a 104,5°C con una diferencia de 3,1°C en relación con EPS₀. Se puede observar que la temperatura de

transición vítrea no muestra diferencias significativas en los materiales en estudio y los valores encontrados para las mezclas de EPS_r están dispersos sin marcar una tendencia definida, sin embargo es posible decir que existe una mínima de decadencia del valor obtenido en las mezclas con respecto al material de referencia (EPS_0) [5 y 47].

Es posible explicar este efecto, por una reducción en el peso molecular debida a una afectación en los enlaces de Van der Waals, que une las moléculas o un grupo de átomos mediante una atracción electrostática débil [74], combinado con la perdida de pentano emitido a la atmósfera a través del ciclo de vida del producto, como se explica en el ACV realizado por Industry Alliance Packaging (2009) [3] y en el momento de la destrucción de la perla de EPS_r al someterla a molido. Esto en concordancia con lo evidenciado en la disminución de carga máxima de rotura cuando se somete a flexión y el aumento del módulo de elasticidad en las mezclas de EPS_v y EPS_r .

4.7. Análisis Termogravimétrico (TGA)

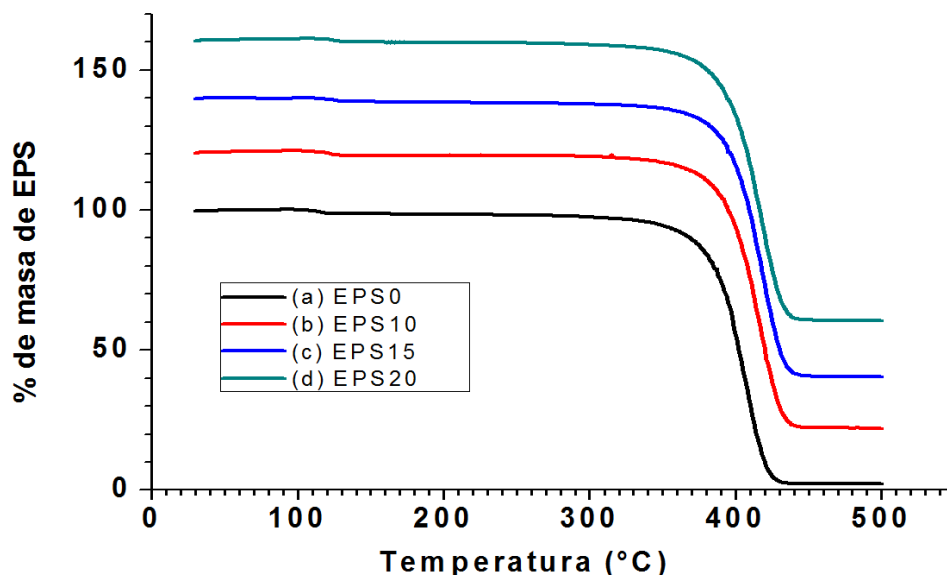


Figura 4.2: Análisis térmico gravimétrico para cuatro muestras de cada una de las formulaciones: (a) EPS_0 , (b) EPS_{10} , (c) EPS_{15} , (d) EPS_{20} . La uniformidad y la superposición de las curvas demuestran la homogeneidad de las mismas. Los datos de porcentaje de masa en las curvas de EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20} se corrieron 20%, 40% y 60% respectivamente.

Fuente: Autora

En la tabla 4.6 se registró el análisis termogravimétrico para el EPS₀ con una temperatura de inicio de la degradación en 326,7°C, para el caso del EPS₁₀ este efecto se da a los 300,2°C, en el EPS₁₅ se obtuvo a partir de los 318°C y para el EPS₂₀ se observó degradación a partir de los 313,6°C.

Material	EPS ₀	EPS ₁₀	EPS ₁₅	EPS ₂₀
Propiedad				
Temperatura de inicio de la degradación del material (°C)	326,7	300,2	318,6	313,6

Tabla 4.6: Resultados de temperatura de inicio de degradación en cada uno de los materiales estudiados obtenidos a través de la técnica TGA. Fuente: Autora

En este ensayo la temperatura de inicio de la degradación en los materiales fabricados que contienen un porcentaje de EPS_r muestra una tendencia a disminuir a medida que la cantidad de material reciclado aumenta. Esto se puede explicar por una variación en la cantidad de masa experimental utilizada para el ensayo TGA en el EPS₀, debido a la homogeneidad del tamaño y contenido de sus perlas las cuales superan en densidad aparente a los materiales fabricados con EPS_r. Sin embargo los termogramas mostrados en la figura 4.2(a)-(d) demuestran homogeneidad en las formulaciones, pues hay clara uniformidad y regularidad de las caídas de la pérdida de masa en función de la temperatura [11], además se asemejan al evaluado en la investigación de León *et.al.* (2007), corroborando conservación de la composición química, dado que se observa una caída dentro del rango de 300 a 400°C aproximadamente, a diferencia de otras mezclas donde se puede dar la degradación en varias caídas, indicativo de la presencia de otros grupos funcionales, muestra de una variación en la composición química del material [39].

4.8. Medición de Conductividad Térmica en Plato Caliente en Régimen Estacionario

Los resultados del ensayo en plato caliente se muestran en la tabla 4.7, registrando una conductividad térmica (k) para el EPS₀ de 0,059 W/mK, comparando este resultado de

referencia con los demás obtenidos se tiene, para el EPS₁₀ una k 0,070 W/mK con una variación de 0,011 correspondiente al 18%, en el caso del EPS₁₅ se obtuvo un k de 0,062 con una variación de 0,003 correspondiente al 5,1% y para el EPS₂₀ se observó una k de 0,056 con una variación de -0,003 correspondiente al 5,1%.

Estos resultados no muestran una tendencia absolutamente definida, por el contrario bastante dispersión de los datos, esto se debe probablemente a la sección de material utilizada como muestra en cada caso y a la posible distribución del material reciclado dentro de la placa estudiada, pues la homogenización en el proceso de producción, aunque es aceptable, no es ideal. A pesar de esto, es posible afirmar de acuerdo a los resultados, que en general los valores de conductividad térmica no presenta una variación significativa, se encuentran entre 0,056 y 0,070 W/mK.

Es probable que en los tres materiales estudiados la proporción de material reciclado puede aportar al aumento de la estructura celular sólida y a su vez, disminuir el contenido de espacios de aire permitiendo transporte de energía vibracional, de traslación y rotación de moléculas, resultante de la colisión con fonones desde las regiones de temperaturas altas a las regiones de temperaturas bajas permitiendo así, una transferencia de flujo de calor. Sin embargo se descarta contribución de conducción térmica electrónica, es decir conducción por electrones libres, pues la variación es pequeña comparada con los buenos conductores [77]. Estos resultados se obtienen trabajando a una temperatura, aproximadamente 30%, por debajo del valor de la temperatura de transición vítrea, evitando así el reblandecimiento de los materiales estudiados.

En cuanto los datos calculados de difusividad térmica (ver apéndice A.5), se obtienen en todos los casos valores por el orden de 10^{-9} m²/s, es decir que al igual que el material de referencia, los materiales estudiados EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ se pueden caracterizar como malos difusores, pues la velocidad de propagación de calor durante cambios de temperatura se hará muy lentamente. Esto se puede observar con los resultados simulados en la sección 4.9.

Material	EPS₀	EPS₁₀	EPS₁₅	EPS₂₀
Propiedad				
Conductividad térmica k (W/mK)	0,059	0,070	0,062	0,056
T promedio de exposición (K)	366,82	337	334,67	342,2
t alcanza régimen estacionario (s)	345600	345600	345600	345600
Densidad ρ (Kg/m ³)	23	22	23	22
Potencia promedio (W)	28,64	17,42	15,81	16,03
Difusividad térmica α (m ² /s)	$4,9 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-9}$	$4,3 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-9}$

Tabla 4.7: Datos de conductividad térmica y tiempo de exposición hasta alcanzar el régimen estacionario obtenidos a través de la técnica de plato caliente. Se determina la densidad según norma ASTM D1622-08 y la difusividad térmica de acuerdo a la ecuación (1.8) explicada en la sección 1.4.4. Fuente: Autora

4.9. Perfil unidimensional de la temperatura en estado no estacionario

A continuación se presentan los perfiles de distribución de temperatura de cada uno de los materiales estudiados, obtenidos en Octave 3.6.4, para el caso de una pared plana con conductividad térmica constante y la difusividad térmica calculada en la sección 4.6.

***Los datos de temperatura en las curvas (b), (c), (d), (e) y (f) de cada una de las placas de los materiales estudiados, fueron intencionalmente desplazados 10, 20, 30, 40 y 50 ° C respectivamente con el fin de mejorar la visualización de los resultados. Las tablas de datos están registradas en el apéndice A.8.*

4.9.1. Perfiles de distribución de temperatura obtenidos en Octave 3.6.4 para el caso de una pared plana

Para una placa de EPS₀ con conductividad térmica constante, espesor L ($L=0,50\text{m}$), difusividad térmica ($\alpha=4,9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), extendida al infinito en las otras dimensiones de tal manera que el flujo de calor en la región considerada es efectivamente unidimensional, la cual se encuentra a una temperatura inicial uniforme $T(0,0) = 0$, es decir, el material se

encuentra a 0°C en todos los 20 nodos (i) en los que se subdivide el espesor para tomar las diferentes mediciones de temperatura en un tiempo (k), ver molécula computacional en la figura 3.6, y de pronto una de las paredes del material se somete a una situación extrema, a un reservorio de temperatura de 80°C , obteniendo el perfil de distribución de temperaturas en función de la distancia y el tiempo mostrado en la figura 4.3 (a)-(f). La programación en Octave se hizo con 500 intervalos de tiempo y cada intervalo corresponde a 5 minutos.

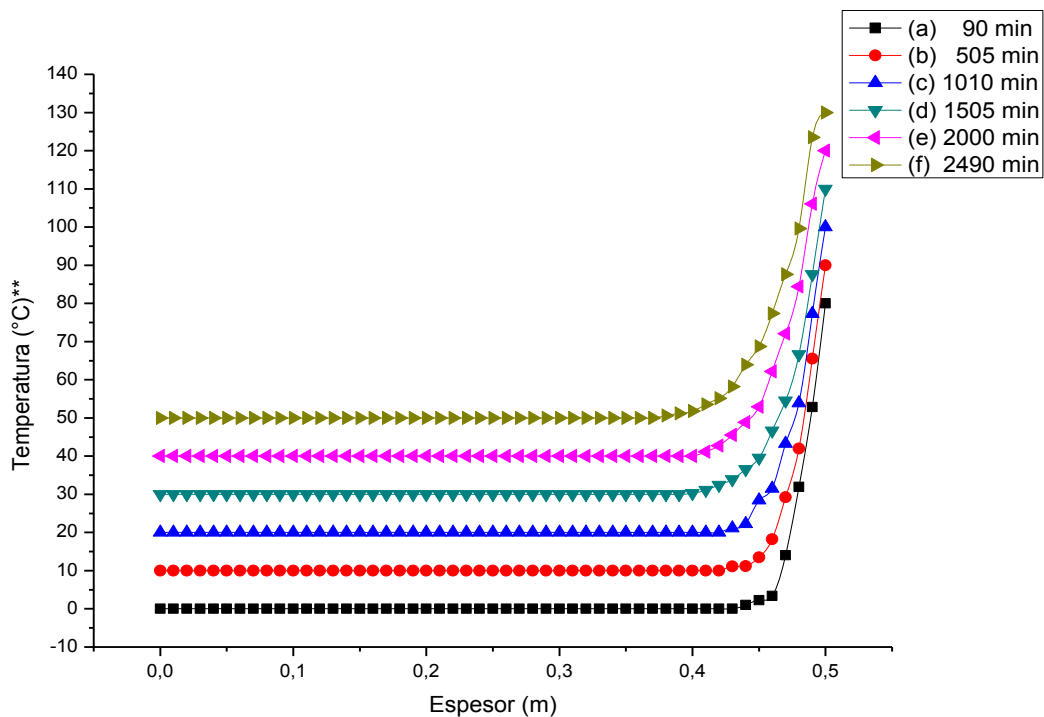


Figura 4.3: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS_0 de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas ($T(0,0)=0^{\circ}\text{C}$ y $T(0,0.5)=80^{\circ}\text{C}$); para una difusividad térmica de $\alpha=4,9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. (a) para un intervalo de tiempo de 18, es decir, 90 minutos (b) para el intervalo de tiempo 101, es decir, 505 minutos (c) para un intervalo de tiempo de 202, es decir, 1010 minutos (d) para un intervalo de tiempo de 301, es decir 1505 minutos (e) para un intervalo de tiempo de 400 es decir 2000 minutos (f) para un intervalo de tiempo de 498, es decir 2490 minutos. Fuente: Autora

Para una placa de EPS_{10} con conductividad térmica constante, espesor L ($L=0,50\text{m}$), difusividad térmica ($\alpha=6,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), extendida al infinito en las otras dimensiones de tal manera que el flujo de calor en la región considerada es efectivamente unidimensional,

suponiendo que el material se encuentra a 0°C en todos los 20 nodos (i) en los que se subdivide el espesor para tomar las diferentes mediciones de temperatura en un tiempo (k) ver molécula computacional en la figura 3.6 y sí una de las paredes del material se somete a una situación extrema, a un reservorio de temperatura de 80°C se obtendrá el perfil de distribución de temperaturas mostrados en la figura 4.4 (a)-(f). La programación en Octave se hizo con 500 intervalos de tiempo y cada intervalo corresponde a 5 minutos.

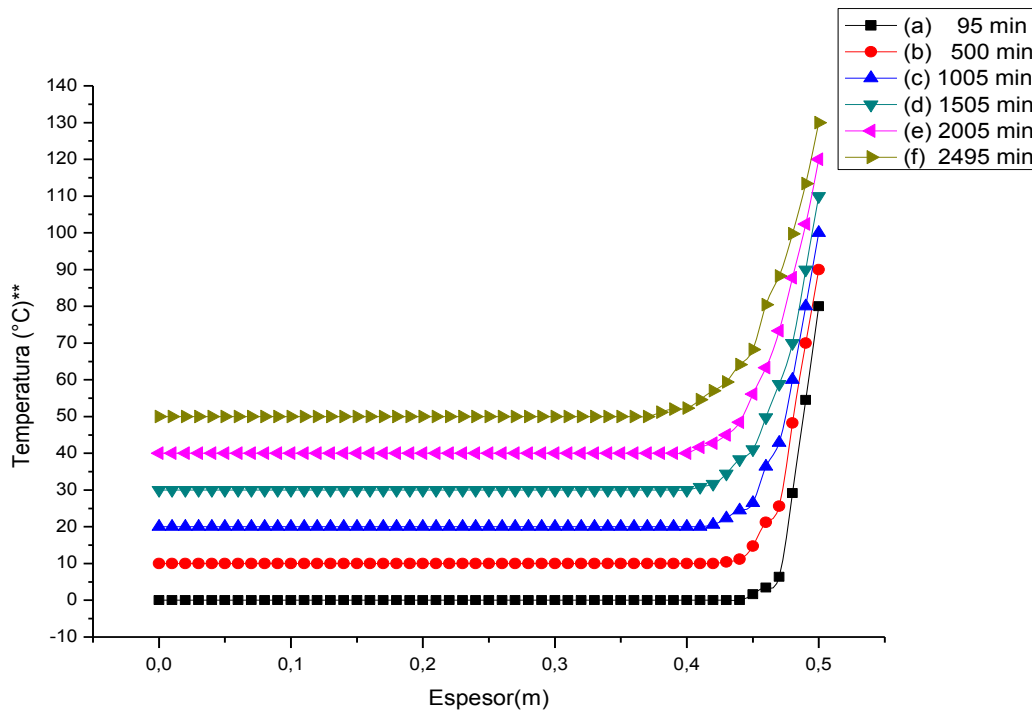


Figura 4.4: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS_{10} de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas ($T(0,0)=0^{\circ}\text{C}$ y $T(0,0.5)=80^{\circ}\text{C}$); para una difusividad térmica de $\alpha=6,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. (a) para un intervalo de tiempo de 19, es decir, 95 minutos (b) para el intervalo de tiempo 100, es decir, 500 minutos (c) para un intervalo de tiempo de 201, es decir, 1005 minutos (d) para un intervalo de tiempo de 301, es decir 1505 minutos (e) para un intervalo de tiempo de 401 es decir 2005 minutos (f) para un intervalo de tiempo de 499, es decir 2495 minutos. Fuente: Autora

Para una placa de EPS_{15} con conductividad térmica constante, espesor L ($L=0,50\text{m}$), difusividad térmica ($\alpha=4,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), extendida al infinito en las otras dimensiones de tal manera que el flujo de calor en la región considerada es efectivamente unidimensional, suponiendo que el material se encuentra a 0°C en todos los 20 nodos (i) en los que se

subdivide el espesor para tomar las diferentes mediciones de temperatura en un tiempo (k) ver molécula computacional en la figura 3.6 y sí una de las paredes del material se somete a una situación extrema, a un reservorio de temperatura de 80°C se obtendrá el perfil de distribución de temperaturas mostrados en la figura 4.5 (a)-(f). La programación en Octave se hizo con 500 intervalos de tiempo y cada intervalo corresponde a 5 minutos.

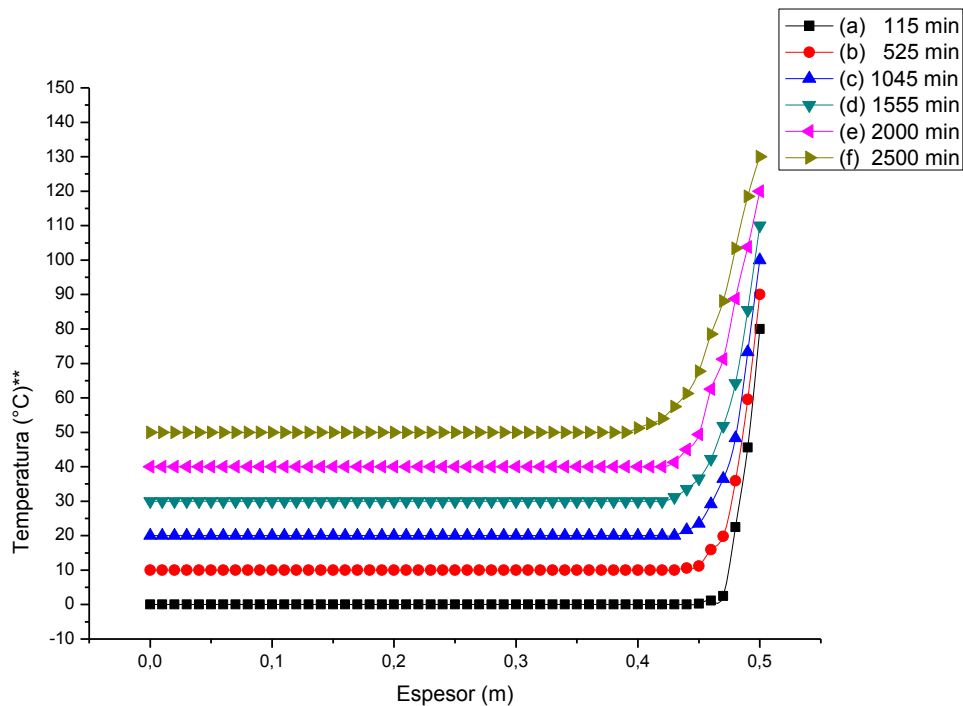


Figura 4.5: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS₁₅ de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas ($T(0,0)=0^{\circ}\text{C}$ y $T(0,0.5)=80^{\circ}\text{C}$); para una difusividad térmica de $\alpha=4,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. (a) para un intervalo de tiempo de 23, es decir, 115 minutos (b) para el intervalo de tiempo 105, es decir, 525 minutos (c) para un intervalo de tiempo de 209, es decir, 1045 minutos (d) para un intervalo de tiempo de 311, es decir 1555 minutos (e) para un intervalo de tiempo de 400 es decir 2000 minutos (f) para un intervalo de tiempo de 500, es decir 2500 minutos. Fuente: Autora

Para una placa de EPS₂₀ con conductividad térmica constante, espesor L ($L=0,50\text{m}$), difusividad térmica ($\alpha=2,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), extendida al infinito en las otras dimensiones de tal manera que el flujo de calor en la región considerada es efectivamente unidimensional, suponiendo que el material se encuentra a 0°C en todos los 20 nodos (i) en los que se

subdivide el espesor para tomar las diferentes mediciones de temperatura en un tiempo (k) ver molécula computacional en la figura 3.6 y si una de las paredes del material se somete a una situación extrema, a un reservorio de temperatura de 80°C se obtendrá el perfil de distribución de temperaturas mostrados en la figura 4.6 (a)-(f). La programación en Octave se hizo con 500 intervalos de tiempo y cada intervalo corresponde a 5 minutos.

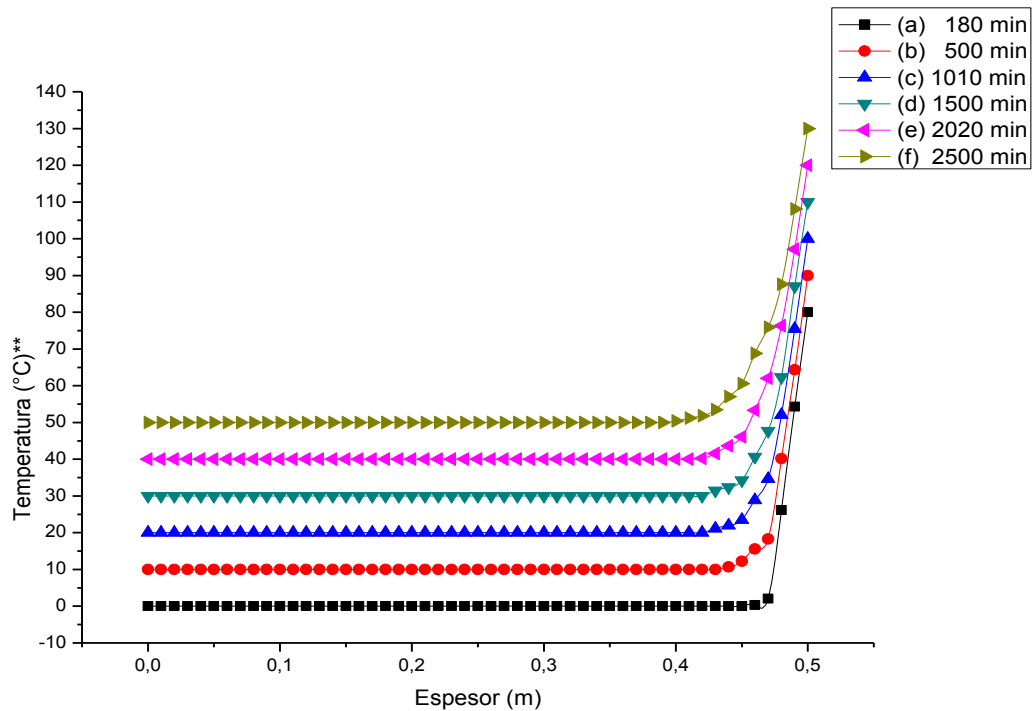


Figura 4.6: Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS₂₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas ($T(0,0)=0^{\circ}\text{C}$ y $T(0,0.5)=80^{\circ}\text{C}$); para una difusividad térmica de $\alpha=2,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. (a) para un intervalo de tiempo de 36, es decir, 180 minutos (b) para el intervalo de tiempo 100, es decir, 500 minutos (c) para un intervalo de tiempo de 202, es decir, 1010 minutos (d) para un intervalo de tiempo de 300, es decir 1500 minutos (e) para un intervalo de tiempo de 404 es decir 2020 minutos (f) para un intervalo de tiempo de 500, es decir 2500 minutos. Fuente: Autora

Al estudiar el caso descrito anteriormente, se obtiene en los perfiles unidimensionales de distribución de temperatura de cada uno de los materiales en estudio los siguientes resultados en el tiempo máximo de medición: para el EPS₀, pasados 2490 min logra una temperatura de 1,76°C en la posición 0,4m; para el EPS₁₀ a los 2495min se encuentra una temperatura de 1,18°C en la posición 0,4m; para el EPS₁₅ a los 2500min se encuentra un

temperatura de $1,25^{\circ}\text{C}$ en un espesor de $0,4\text{m}$ y para el EPS_{20} a los 2500min se encuentra un temperatura de $0,4^{\circ}\text{C}$ los $0,4\text{m}$. Sin alcanzar el equilibrio térmico en ninguno de los casos, es decir la temperatura siguió variado tanto en la posición como en el tiempo.

Existe una relación directamente proporcional entre los datos obtenidos y la difusividad térmica, por lo cual se esperaba que no existiera una tendencia lineal. Sin embargo, se corrobora que la velocidad de propagación de calor durante cambios de temperatura se hace muy lentamente, pues la temperatura en la posición $0,4\text{m}$ de los materiales en estudio varia en un rango de $0,4^{\circ}\text{C}$ a $1,76^{\circ}\text{C}$; por lo cual se puede afirmar que los materiales Fabricados EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20} ; se caracterizan como malos difusores al igual que el material de referencia EPS_0 . [11]

En el apéndice A.8. se pueden ver las tablas de datos completas de los perfiles de distribución de temperatura de cada uno de los materiales estudiados.

CONCLUSIONES

Para los materiales estudiados EPS_{10} , EPS_{15} , EPS_{20} y para las propiedades medidas utilizando como material de referencia el EPS_0 : Resistencia a compresión, resistencia a flexión, resistencia al impacto, transición vítrea (T_g), calor específico (c_p) y conductividad térmica (k) se puede concluir lo siguiente:

- Se lograron producir materiales a partir de mezclas entre EPS_v y EPS_r con porcentajes en peso de material reciclado de los desechos del sector alimenticio 10, 15 y 20%; mediante la utilización del método de reprocesamiento secundario. Es posible causar un impacto positivo puesto que se reduce la cantidad de EPS_v requerido para la elaboración de algunos productos.
- Los espectros comparativos permiten afirmar que las mezclas de EPS_{10} , EPS_{15} y EPS_{20} no difieren significativamente del EPS_0 , pues la superposición de las bandas características en cada uno de los materiales corresponden al mismo polímero, no hay evidencia de grupos oxigenados formados por agentes ambientales o la conformación estructuras intermedias que afecten las características de los componentes de partida.
- La Resistencia a la compresión de los tres materiales fabricados, comparada con el material de referencia no presenta cambios significativos, lo cual indica que esta no se ve afectada por el cambio de tamaño de grano ni por el tipo de materia prima, sin embargo tan solo se puede aseverar para cargas a corto plazo, conviene realizar ensayos con cargas a largo plazo.

- El módulo de elasticidad presenta un aumento en los tres materiales con respecto al EPS₀, es decir, el componente elástico disminuye al aumentar el valor de la pendiente en este sector de la curva en las mezclas estudiadas. Esto indica que el componente rígido se incrementa.
- Existe una afectación a la resistencia por flexión, es posible que al destrozarse las celdillas de EPS liberen gas de aire-n pentano y a su vez pierdan capacidad de cohesión entre ellas, por lo tanto dependen de las perlas vírgenes para mantenerse juntas. Se recomienda descartar el material fabricado EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ para aplicaciones donde este se vea sometido a cargas por flexión superiores a los 40N.
- La resistencia al impacto en general se conserva con respecto al material de referencia, Este comportamiento permite corroborar ausencia de efectos significativos en las mezclas de EPS_v y EPS_r que provoquen formación de fases o estructuras intermedias que afecten las características de los componentes de partida.
- La regularidad de las caídas de la pérdida de masa en función de la temperatura demuestra la homogeneidad de las mezclas y admisión del proceso de fabricación del material.
- La temperatura de transición vítrea presenta una mínima decadencia con respecto al EPS₀. Esto se puede explicar por reducción de peso molecular en cada una de las mezclas, afectadas por el porcentaje de material molido. Sin embargo, los actuales procesos de termo-formado son compatibles con el material fabricado EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀.
- No se presenta regularidad en los valores teóricos de la difusividad térmica en función del porcentaje de material reciclado en cada formulación, sin embargo el orden de magnitud de las mismas se mantiene en 10⁻⁹ m²/s. De tal manera la aproximación de la distribución de temperatura en el material de referencia EPS₀ comparada con los materiales fabricados EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ muestran poca variación con respecto al tiempo y a la distancia, es

decir que la capacidad del material para conducir el calor con respecto a su capacidad para almacenar energía interna se mantiene baja.

- El proceso aplicado para la recuperación del material provoca un mínimo aumento en la conductividad térmica, sin embargo no hay una tendencia definida en proporción con el contenido de material reciclado en cada formulación, esto probablemente a que la homogenización de las mezclas a pesar de ser aceptable, no es ideal. Es posible explicar este comportamiento, pues en los tres materiales estudiados la proporción de material reciclado puede aportar al aumento de la estructura celular sólida y a su vez, disminuir el contenido de espacios de aire permitiendo mayor transporte de energía vibracional, de traslación y rotación de moléculas. Sin embargo se descarta contribución de conducción térmica electrónica, es decir conducción por electrones libres, pues la variación es pequeña comparada con los buenos conductores [77].
- Las características mecánicas de los materiales fabricados EPS₁₀, EPS₁₅ y EPS₂₀ quedan definidas como polímeros espumados con una buena capacidad de resistencia cuando se somete a esfuerzos de compresión e impacto y deficiente resistencia cuando se somete a esfuerzos de flexión. Esto permite establecer que se conserva la estructura de cadenas largas que proporcionan resistencia, exceptuando cuando el material es sometido a flexión o a tracción, donde posiblemente se presenten ramificaciones que suministran tenacidad.

APPENDIX 1

A.1. Curvas Compresión – Deformación obtenidas de acuerdo a las especificaciones dadas en las normas ASTM D7557-09 y D1621-10

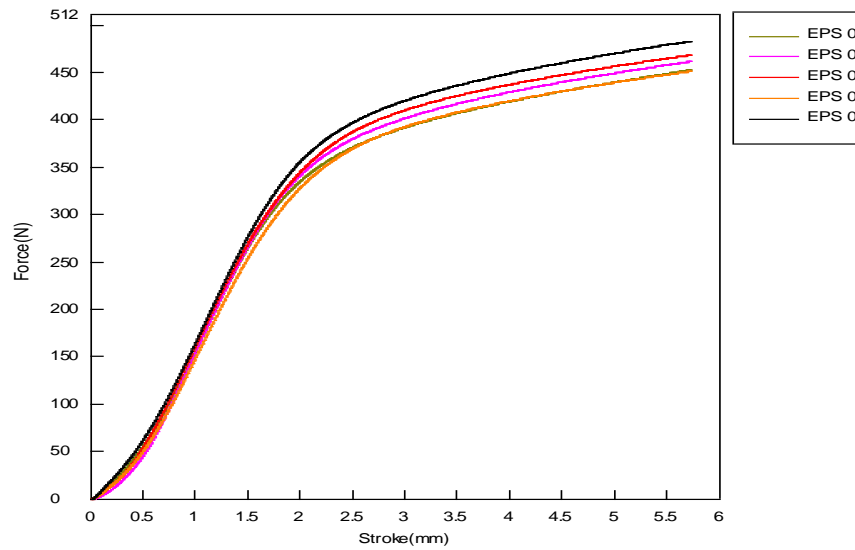


Figura A.1.1: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de EPS₀. Fuente: Autora

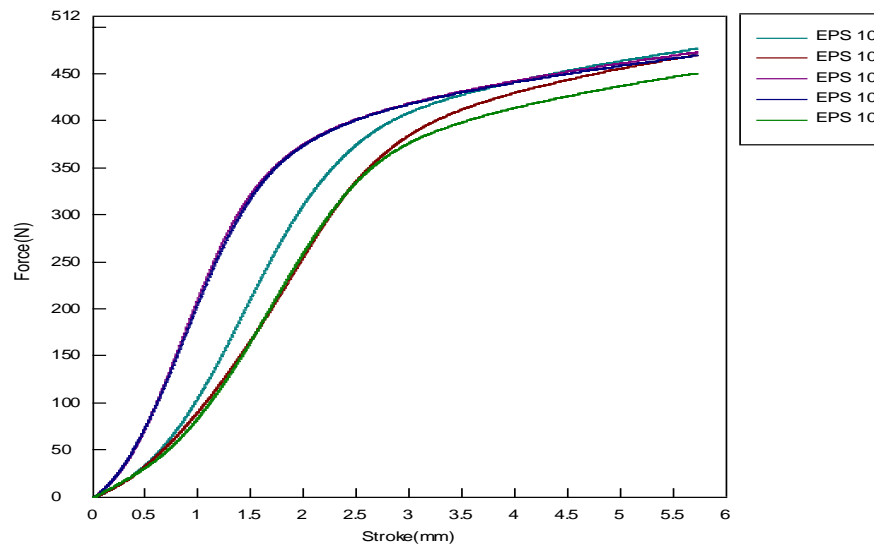


Figura A.1.2: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de la formulación EPS₁₀. Fuente: Autora

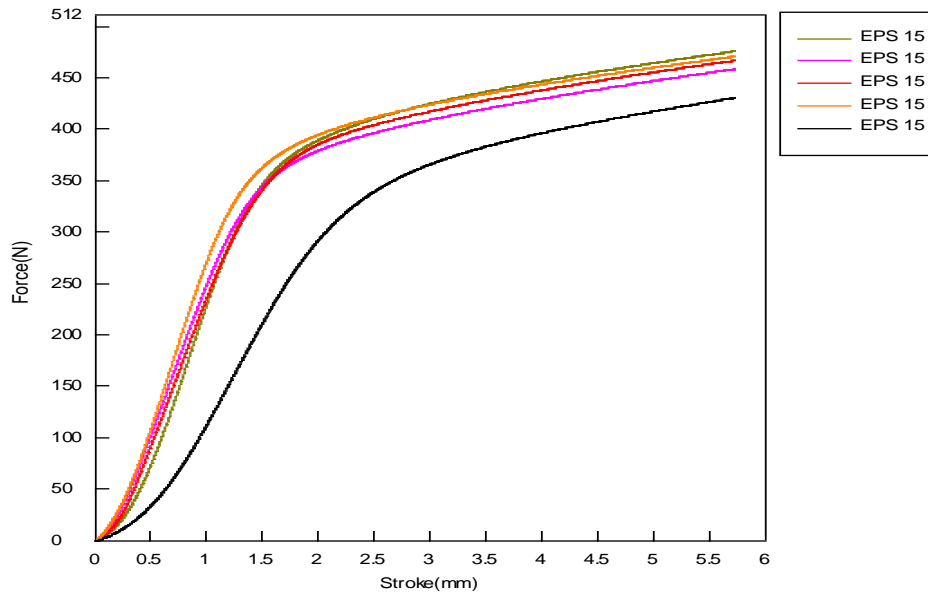


Figura A.1.3: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de la formulación EPS15.
Fuente: Autora

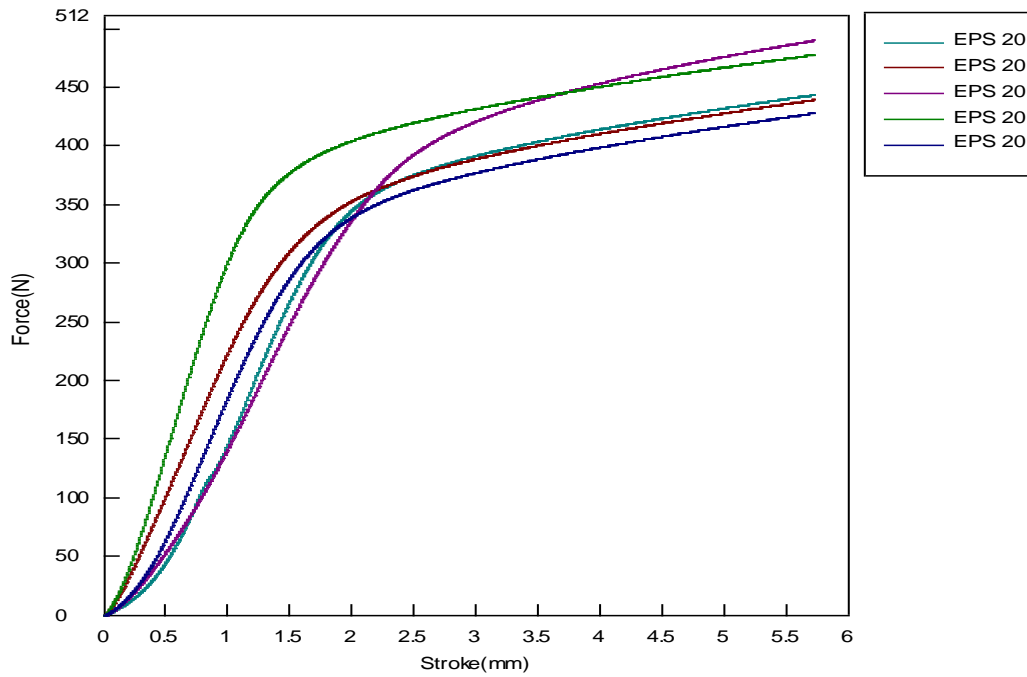


Figura A.1.4: Ensayo de resistencia a compresión para 5 muestras de la formulación EPS20.
Fuente: Autora

A.2. Cálculos para determinar los parámetros mecánicos a partir de las curvas de compresión–deformación.

En las gráficas se extiende con cuidado la línea recta para ubicar la deformación cero, no se evidencia un límite de elasticidad, por lo tanto se deben ubicar los puntos que se muestran en la figura A.2.1.

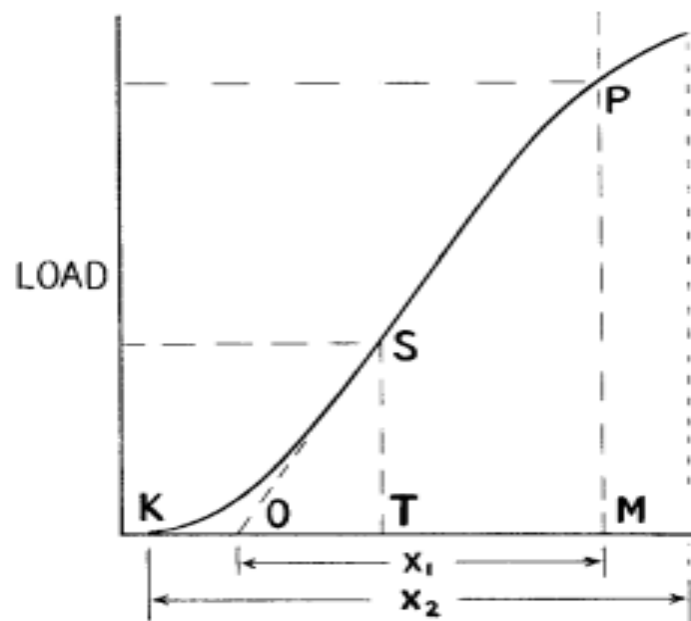


Figura A.2.1: Resistencia a la compresión. Fuente: [90]

Donde:

K= Inicio del ensayo

O= Deformación cero

S= Cualquier punto sobre la recta de mayor pendiente

P= Punto donde cambia la pendiente de la recta

M= Coordenada en x del punto P

T= Coordenada en x del punto S

Para determinar la Resistencia a la compresión se utiliza la ecuación (A.1)

$$R_c = \frac{C}{A} \quad (A.1)$$

Donde:

R_c = Resistencia a la compresión (Mpa)

C = Carga en el punto P (N)

A = Área sección transversal de la muestra (m²)

Para determinar el modulo por compresión se utiliza la ecuación (A.2)

$$E_c = \frac{WH}{AD} \quad (A.2)$$

Donde:

W = carga (en el punto S)

H = altura inicial de la muestra

A = área de la sección transversal horizontal inicial

D = deformación (x= distancia O - T)

Para determinar la desviación estándar estimada se utiliza la ecuación (A.3)

$$s = \sqrt{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)/(n - 1)} \quad (A.3)$$

Donde:

s = desviación estándar estimada

x = valor de una sola observación

n = número de observaciones

\bar{x} = media aritmética del conjunto de observaciones

N°	D(m)	A(m)	H(m)	P(N)	S(N)	M(m)	O(m)	T(m)	X1 (m)	X2(m)	Ec (Mpa)	Rc (Mpa)
1	0,0009	0,003364	0,044	380	200	0,00235	0,00025	0,00115	0,0021	0,00575	2,9	0,113
2	0,0009	0,003364	0,044	375	200	0,00225	0,00025	0,00115	0,002	0,00575	2,9	0,111
3	0,0009	0,003364	0,044	370	200	0,0024	0,00025	0,00115	0,00215	0,00575	2,9	0,110
4	0,0009	0,003364	0,044	365	200	0,00235	0,00025	0,00115	0,0021	0,00575	2,9	0,109
5	0,00095	0,003364	0,044	365	195	0,00235	0,00025	0,0012	0,0021	0,00575	2,7	0,109
										promedio	2,86	0,110
										SD	0,10	0,002

Tabla A.1. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS₀ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora

N°	D(m)	A(m)	H(m)	P(N)	S(N)	M(m)	O(m)	T(m)	X1 (m)	X2(m)	Ec (Mpa)	Rc (Mpa)
1	0,0006	0,003364	0,044	363	200	0,00185	0,00025	0,00085	0,0015	0,00575	4,4	0,108
2	0,0006	0,003364	0,044	363	200	0,00185	0,00025	0,00085	0,0015	0,00575	4,4	0,108
3	0,0009	0,003364	0,044	380	225	0,0025	0,0005	0,0014	0,002	0,00575	3,3	0,113
4	0,0012	0,003364	0,044	385	225	0,003	0,0006	0,0018	0,0024	0,00575	2,5	0,114
5	0,0012	0,003364	0,044	375	225	0,00285	0,0006	0,0018	0,00225	0,00575	2,5	0,111
promedio											3,38	0,111
SD											0,96	0,003

Tabla A.2. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS₁₀ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora

N°	D(m)	A(m)	H(m)	P(N)	S(N)	M(m)	O(m)	T(m)	X1 (m)	X2(m)	Ec (Mpa)	Rc (Mpa)
1	0,00055	0,003364	0,044	375	200	0,0015	0,0002	0,00075	0,0013	0,00575	4,8	0,111
2	0,00057	0,003364	0,044	370	200	0,0017	0,0002	0,00077	0,0015	0,00575	4,6	0,110
3	0,0006	0,003364	0,044	370	200	0,0017	0,0002	0,0008	0,0015	0,00575	4,4	0,110
4	0,0006	0,003364	0,044	370	200	0,0018	0,0002	0,0008	0,0016	0,00575	4,4	0,110
5	0,00075	0,003364	0,044	330	180	0,0023	0,0006	0,00135	0,0017	0,00575	3,1	0,098
promedio											4,24	0,108
SD											0,64	0,006

Tabla A.3. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS₁₅ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora

N°	D(m)	A(m)	H(m)	P(N)	S(N)	M(m)	O(m)	T(m)	X1 (m)	X2(m)	Ec (Mpa)	Rc (Mpa)
1	0,0005	0,003364	0,044	375	200	0,0014	0,0001	0,0006	0,0013	0,00575	5,2	0,111
2	0,00065	0,003364	0,044	390	170	0,00235	0,0001	0,00075	0,00225	0,00575	3,4	0,116
3	0,00065	0,003364	0,044	360	165	0,0019	0,0002	0,00085	0,00105	0,00575	3,3	0,107
4	0,00075	0,003364	0,044	365	175	0,0021	0,00035	0,0011	0,001	0,00575	3,1	0,109
5	0,00075	0,003364	0,044	360	175	0,0021	0,00035	0,0011	0,001	0,00575	3,1	0,107
promedio											3,62	0,110
SD											0,92	0,004

Tabla A.4. Resultados de análisis de curvas deformación-compresión para 5 muestras de EPS₂₀ utilizado la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora

A.3. Curvas flexión – Deformación obtenidas de acuerdo a las especificaciones dadas en la norma C203-05(2012).

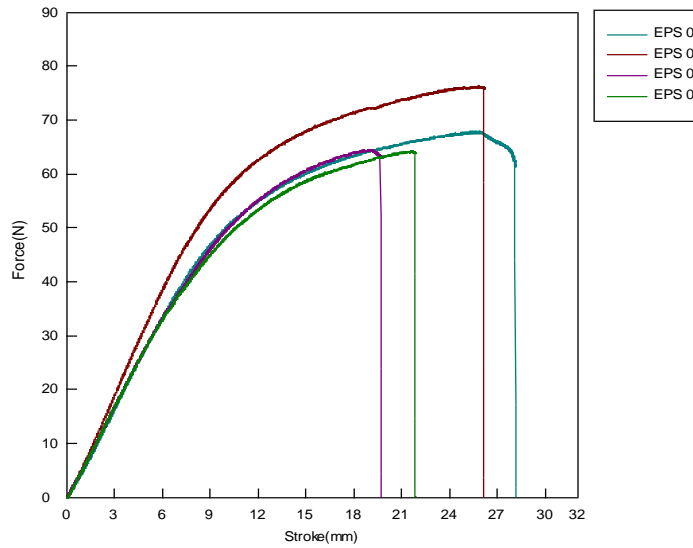


Figura A.3.1: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS₀. Fuente: Autora

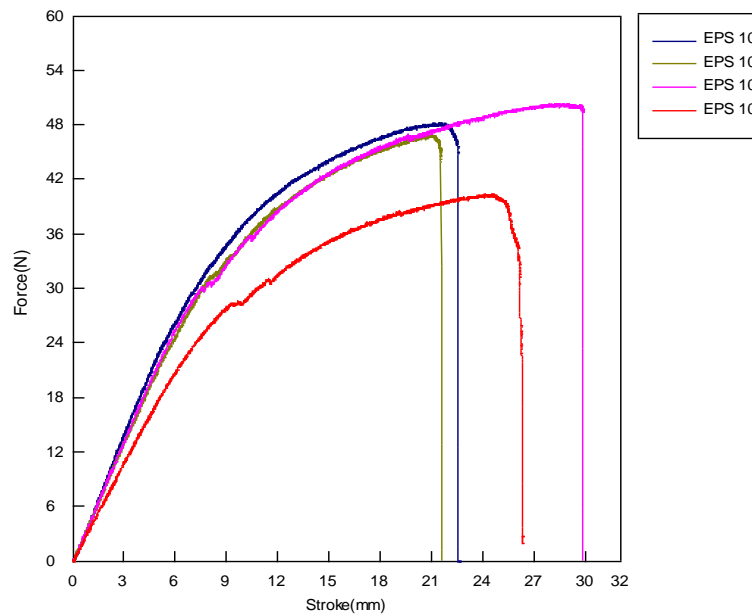


Figura A.3.2: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS₁₀. Fuente: Autora

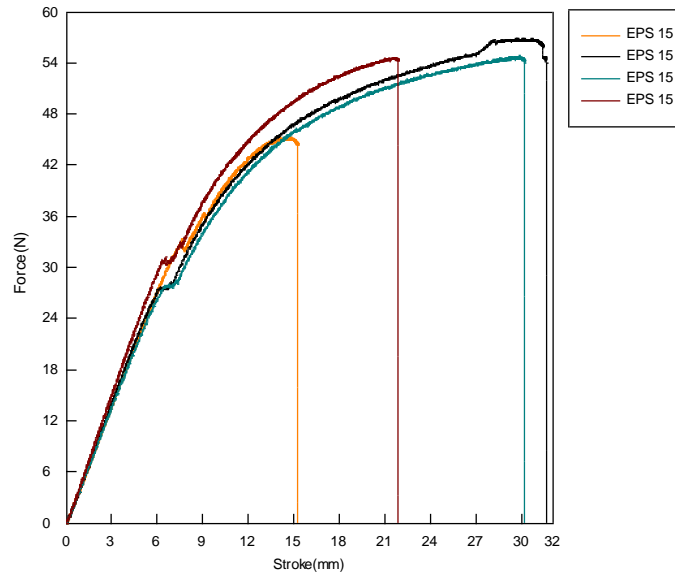


Figura A.3.3: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS₁₅. Fuente: Autora

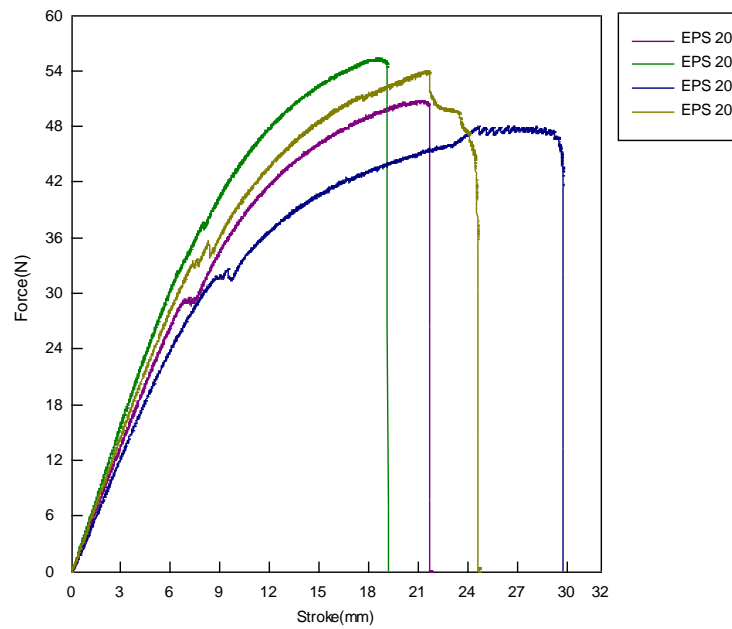


Figura A.3.4: Ensayo de resistencia a flexión para 4 muestras de EPS₂₀. Fuente: Autora

A.4. Cálculos para determinar Calor específico (C_p)

Calculos para determinar calor especifico														
	T1(vidrio) °C	T1(vidrio)K	Tg(sólido)°C	Tg(sólido)K	Q(vidrio) _{Tg} J/s	tiempo (s)	Q(vidrio)Tg KJ	Q(sólido) _{Tg} J/s	tiempo (s)	Q(sólido)Tg KJ	m (Kg)	T (°C)	T (K)	ΔC_p KJ/Kg.K
EPS0	107,26	380,41	99,14	372,29	-0,01	807,12	-0,0048	-0,01	709,68	-0,0042	0,0000030	101,45	374,60	0,52
EPS10	100,24	373,39	92,79	365,94	-0,01	722,88	-0,0042	-0,01	633,48	-0,0036	0,0000029	96,55	369,70	0,50
EPS15	102,85	376,00	92,64	365,79	-0,01	754,20	-0,0044	-0,01	631,68	-0,0037	0,0000032	97,08	370,23	0,63
EPS20	109,08	382,23	96,41	369,56	-0,01	828,96	-0,0046	-0,01	676,92	-0,0036	0,0000026	104,50	377,65	0,92

Tabla A.5. Resultados de los cálculos de calor específico a partir de las curvas proporcionadas por el DSC, utilizando la herramienta Microsoft Excel 2013 Fuente: Autora

A.5. Cálculos para determinar difusividad térmica (α)

Calculos para determinar difusividad termica (α)				
	ρ (Kg/m ³)	ΔC_p (J/Kg.K)	k(J/smK)	α (m ² /s)
EPS0	23	520,00	0,000059	4,9E-09
EPS10	22	500,00	0,00007	6,4E-09
EPS15	23	630,00	0,000062	4,3E-09
EPS20	22	920,00	0,000056	2,8E-09

Tabla A.6. Cálculos para determinar teóricamente la difusividad térmica de acuerdo a la ecuación (1.8) explicada en la sección 1.4.4., utilizando la herramienta Microsoft Excel 2013. Fuente: Autora

A.6. Termogramas TGA

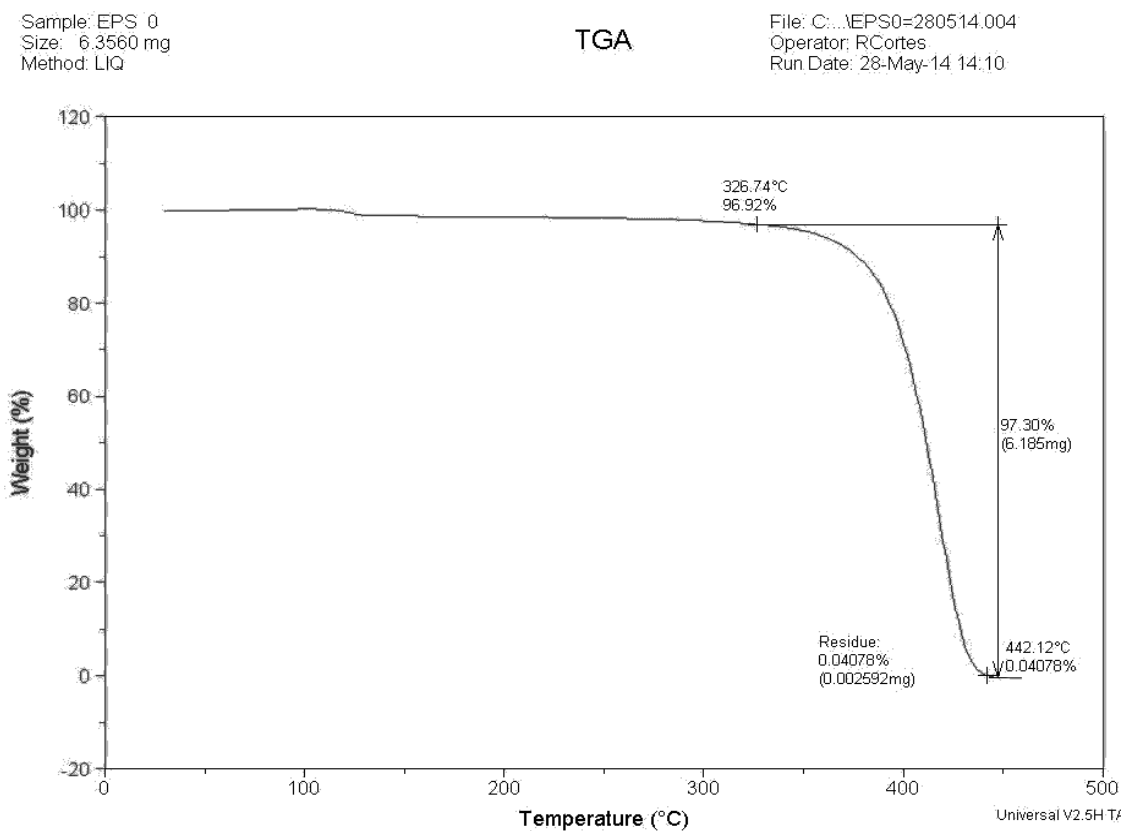


Figura A.6.1: Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS₀. Fuente: Autora

Sample: EPS 10 %
Size: 3.9540 mg
Method: LIQ

TGA

File: C:\...EPS10%190514.000
Operator: RCortes
Run Date: 19-May-14 08:02

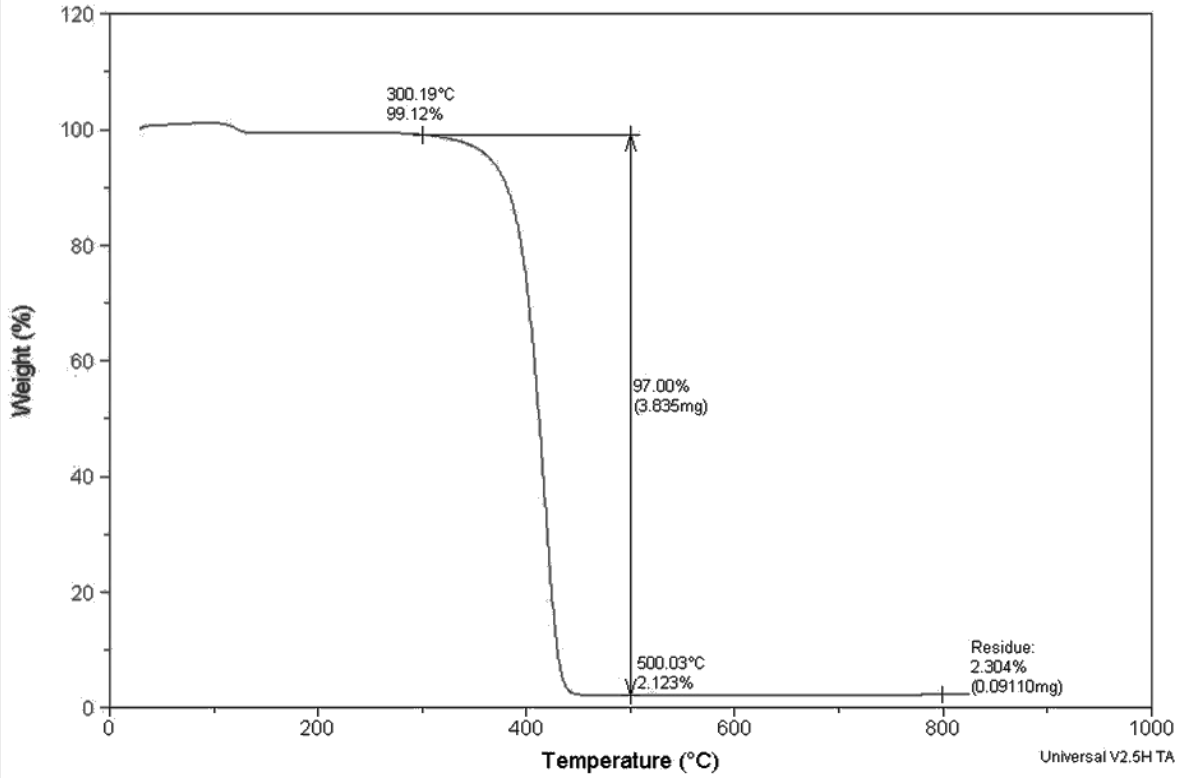


Figura A.6.2: Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS₁₀. Fuente: Autora

Sample: EPS 15%
Size: 6.4340 mg
Method: LIQ

TGA

File: C:\...EPS15%280514.003
Operator: RCortes
Run Date: 28-May-14 10:18

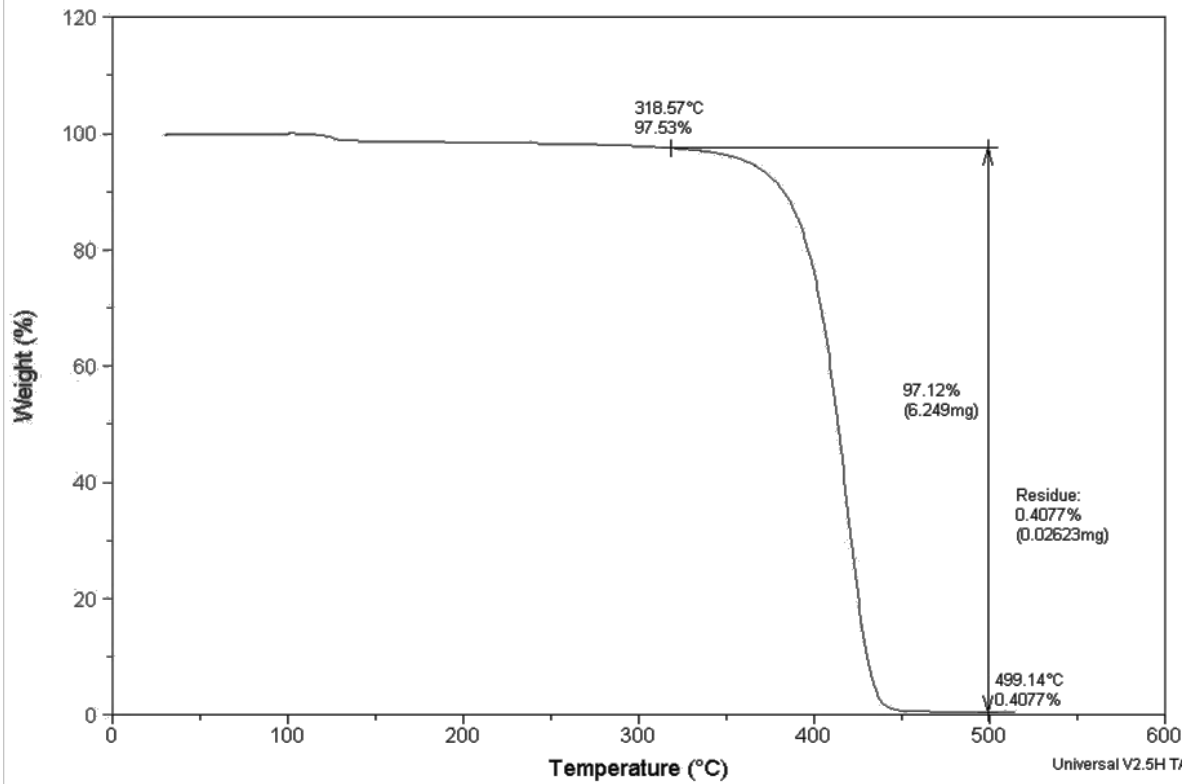


Figura A.6.3: Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS15. Fuente: Autora

Sample: EPS 20%
Size: 3.9170 mg
Method: LIQ

TGA

File: C:\...EPS20%I1280514.002
Operator: RCortes
Run Date: 28-May-14 08:02

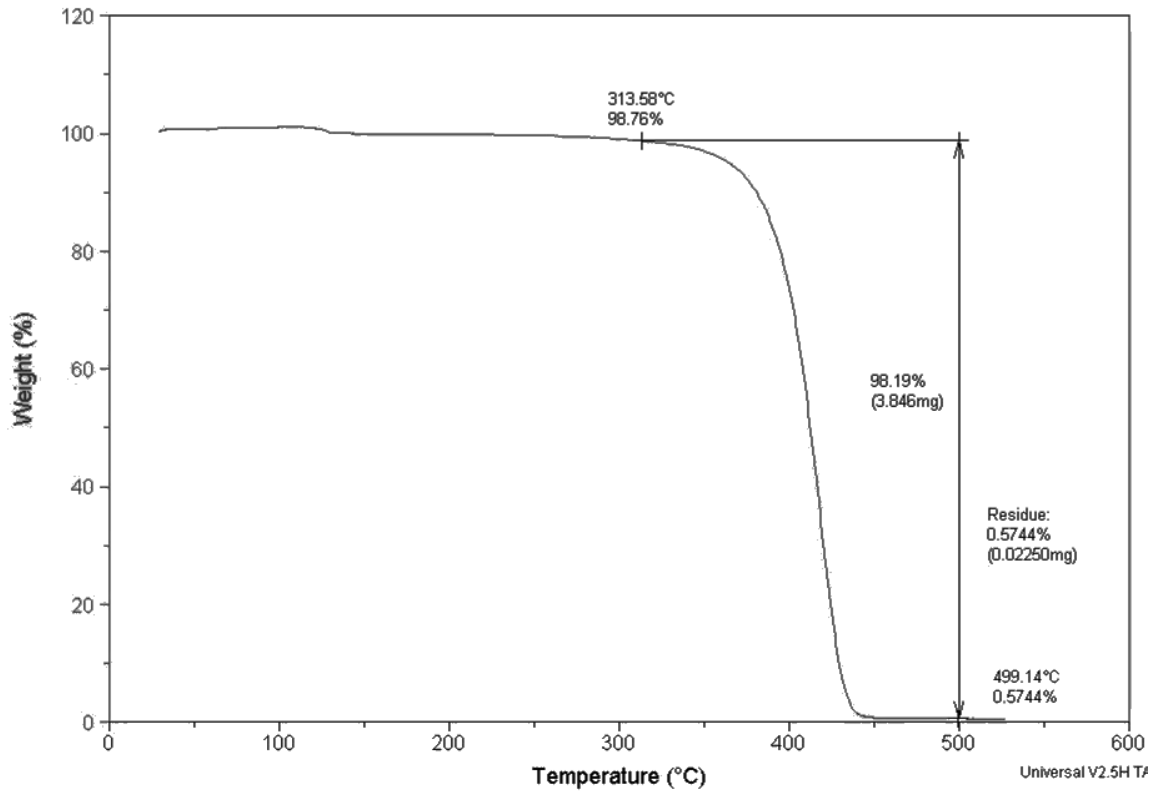


Figura A.6.4. Análisis térmico gravimétrico para la formulación EPS₂₀. Fuente: Autora

A.7. Cálculos para determinar el momento máximo en el ensayo de flexión de 3 puntos

Con base en el numeral 1.3.3, una variación lineal de los esfuerzos normales σ_x , se expresa así:

$$\sigma_x = \frac{y}{c} \sigma_{ext} \quad (\text{A.4})$$

En donde:

y = distancia hasta el eje neutro

c = Distancia a la fibra extrema

Si se aplica un momento positivo M_z , las condiciones de equilibrio exigen que en cualquier sección transversal la suma de las fuerzas en la dirección x debe ser igual a cero. Por lo tanto es posible determinar el valor del momento máximo y momento de inercia de la sección como se desarrolla en Apéndice 2. Obteniendo los resultados que se resumen en la tabla 1.3. Entonces, de acuerdo con la relación entre las componentes del esfuerzo y las acciones internas se tiene:

$$P = \int \sigma_x dA = 0 \quad \text{o bien: } \frac{\sigma_{ext}}{c} \int_A y dA = 0$$

Y para valores diferentes a cero de σ_{ext} y c ,

$$\int_A y dA = 0$$

Esto implica que el eje neutro coincide con el eje centroidal del elemento.

Además del equilibrio de fuerzas horizontales debe satisfacer el equilibrio de momentos, esto exige que:

$dM_z = \sigma_x dAy$ e integrando se tiene,

$$\int dM_z = \int_A y \sigma_x dA$$

Sustituyendo el valor σ_x se obtiene,

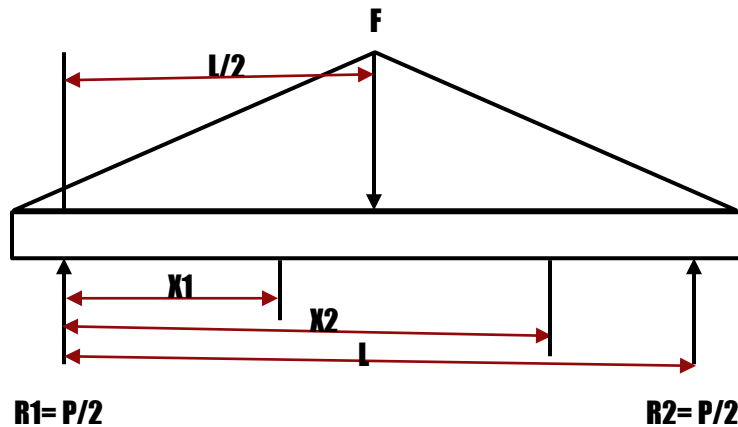
$$M_z = \int_A y \sigma_{ext} \frac{y}{c} dA$$

$$Mz = \frac{\sigma_{ext}}{c} \int_A y^2 dA \quad (A.5)$$

Por definición, el término $\int_A y^2 dA$ es el momento de inercia del área de la sección transversal con respecto al eje z y se designa mediante I, el cual tiene dimensión de longitud a la cuarta potencia y reemplazando M_z por M se obtiene:

$$M = \frac{\sigma_{ext}}{c} I \quad (A.6)$$

Por lo tanto para determinar el momento máximo en el ensayo de flexión de 3 puntos será:



$$0 \leq x_1 \leq \frac{L}{2} \quad M = \frac{F}{2} x \quad \text{y para } x_1 = \frac{L}{2} \text{ el resultado es } M_{max} = \frac{FL}{4}$$

$$-\frac{L}{2} < x_2 < L \quad M = \frac{F}{2} x - F \left(x - \frac{L}{2} \right) = \frac{FL}{2} - \frac{Fx}{2} \text{ y para } x_2 = \frac{L}{2}$$

el resultado es :

$$M_{max} = \frac{FL}{4} \quad (A.7)$$

Determinando su esfuerzo máximo con la ecuación (A.6) y (A.7) se tiene:

$$M = \frac{\sigma_{ext}}{c} I$$

$$I_x = BH^3/12$$

Donde:

B = base del rectángulo

H = altura del rectángulo

Entonces:

$$\sigma_{ext} = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_{ext} = \frac{\frac{FL}{4} \cdot \frac{H}{2}}{\frac{BH^3}{12}} = \frac{12FLH}{8BH^3} = \frac{3FL}{2BH^2} \quad (\text{A.8})$$

A.8. Tablas de datos perfil de distribución de temperaturas por material estudiado

POLIESTIRENO EXPANDIDO VIRGEN (EPS ₀)											
ESPESOR (m)	TEMPERATURA (°C)										
	90 min	505 min	**	1010 min	**	1505 min	**	2000 min	**	2490 min	**
0	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,01	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,02	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,03	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,04	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,05	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,06	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,07	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,08	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,09	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,1	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,11	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,12	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,13	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,14	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,15	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,16	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,17	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,18	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,19	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,2	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,21	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,22	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,23	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,24	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,25	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,26	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,27	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,28	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,29	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,3	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,31	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00

0,32	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,33	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,34	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,35	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,36	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,37	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,38	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,59	50,59
0,39	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	1,18	51,18
0,4	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,30	30,30	0,00	40,00	1,76	51,76
0,41	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	1,11	31,11	1,11	41,11	3,53	53,53
0,42	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	2,44	32,44	2,72	42,72	5,17	55,17
0,43	0,00	1,12	11,12	1,14	21,14	3,88	33,88	5,55	45,55	8,23	58,23
0,44	1,00	1,17	11,17	2,26	22,26	6,55	36,55	8,88	48,88	13,94	63,94
0,45	2,24	3,51	13,51	8,44	28,44	9,52	39,52	12,88	52,88	18,70	68,70
0,46	3,36	8,19	18,19	11,53	31,53	16,65	46,65	22,20	62,20	27,40	77,40
0,47	14,04	19,21	29,21	23,31	43,31	24,53	54,53	32,08	72,08	37,63	87,63
0,48	31,92	31,94	41,94	33,90	53,90	36,63	66,63	44,40	84,40	49,62	99,62
0,49	52,86	55,50	65,50	57,33	77,33	57,63	87,63	66,09	106,09	73,48	123,48
0,5	80,00	80,00	90,00	80,00	100,00	80,00	110,00	80,00	120,00	80,00	130,00

Tabla A.7. Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas (T(0,0)=0°C y T(0,0.5)=80°C); para una difusividad térmica de $\alpha=4,9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Fuente: Autora**

MEZCLA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO VIRGEN Y RECICLADO(EPS ₁₀)											
ESPESOR (m)	TEMPERATURA (°C)										
	95 min	500 min	**	1005 min	**	1505 min	**	2005 min	**	2495 min	**
0	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,01	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,02	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,03	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,04	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,05	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,06	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,07	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,08	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,09	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,1	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,11	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,12	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,13	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,14	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,15	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,16	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,17	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,18	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,19	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,2	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,21	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,22	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,23	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,24	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,25	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,26	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,27	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,28	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,29	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,3	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,31	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,32	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00

0,33	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,34	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,35	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,36	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,37	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,38	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	1,18	51,18
0,39	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	2,00	52,00
0,4	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	2,29	52,29
0,41	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,80	30,80	1,66	41,66	4,59	54,59
0,42	0,00	0,00	10,00	0,59	20,59	1,66	31,66	2,77	42,77	7,06	57,06
0,43	0,00	0,41	10,41	2,36	22,36	4,44	34,44	4,99	44,99	9,41	59,41
0,44	0,00	1,18	11,18	4,48	24,48	8,32	38,32	8,44	48,44	14,11	64,11
0,45	1,62	4,72	14,72	6,49	26,49	11,10	41,10	16,09	56,09	18,23	68,23
0,46	3,46	11,21	21,21	16,40	36,40	19,76	49,76	23,31	63,31	30,46	80,46
0,47	6,37	15,58	25,58	22,89	42,89	28,86	58,86	33,30	73,30	38,22	88,22
0,48	29,16	38,23	48,23	40,00	60,00	40,00	70,00	47,73	87,73	49,75	99,75
0,49	54,54	60,00	70,00	60,00	80,00	60,00	90,00	62,38	102,38	63,39	113,39
0,5	80,00	80,00	90,00	80,00	100,00	80,00	110,00	80,00	120,00	80,00	130,00

Tabla A.8. Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS₁₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas (T(0,0)=0°C y T(0,0.5)=80°C); para una difusividad térmica de $\alpha=6,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Fuente: Autora**

MEZCLA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO VIRGEN Y RECICLADO(EPS ₁₅)											
ESPESOR (m)	TEMPERATURA (°C)										
	115 min	525 min	**	1045 min	**	1555 min	**	2000 min	**	2500 min	**
0	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,01	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,02	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,03	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,04	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,05	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,06	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,07	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,08	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,09	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,1	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,11	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,12	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,13	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,14	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,15	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,16	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,17	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,18	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,19	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,2	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,21	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,22	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,23	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,24	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,25	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,26	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,27	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,28	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,29	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,3	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,31	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,32	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00

0,33	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,34	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,35	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,36	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,37	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,38	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,39	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,4	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	1,25	51,25
0,41	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	2,50	52,50
0,42	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	4,00	54,00
0,43	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	1,18	31,18	1,25	41,25	7,50	57,50
0,44	0,00	0,60	10,60	1,65	21,65	3,54	33,54	5,00	45,00	11,25	61,25
0,45	0,23	1,18	11,18	3,54	23,54	6,62	36,62	9,37	49,37	17,75	67,75
0,46	1,14	5,90	15,90	9,20	29,20	12,27	42,27	22,50	62,50	28,50	78,50
0,47	2,51	9,79	19,79	16,52	36,52	21,83	51,83	31,25	71,25	38,13	88,13
0,48	22,46	25,96	35,96	28,32	48,32	34,22	64,22	48,75	88,75	53,37	103,37
0,49	45,60	49,56	59,56	53,34	73,34	55,46	85,46	63,75	103,75	68,50	118,50
0,5	80,00	80,00	90,00	80,00	100,00	80,00	110,00	80,00	120,00	80,00	130,00

Tabla A.9. Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS₁₅ de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas (T(0,0)=0°C y T(0,0.5)=80°C); para una difusividad térmica de $\alpha=4,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Fuente: Autora**

MEZCLA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO VIRGEN Y RECICLADO(EPSto)											
ESPESOR (m)	TEMPERATURA (°C)										
	180 min	500 min	**	1010 min	**	1500 Min	**	2020 min	**	2500 min	**
0	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,01	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,02	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,03	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,04	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,05	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,06	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,07	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,08	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,09	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,1	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,11	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,12	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,13	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,14	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,15	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,16	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,17	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,18	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,19	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,2	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,21	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,22	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,23	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,24	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,25	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,26	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,27	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,28	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,29	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,3	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,31	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,32	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00

0,33	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,34	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,35	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,36	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,37	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,38	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,39	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00	50,00
0,4	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,40	50,40
0,41	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	1,18	51,18
0,42	0,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,24	40,24	1,76	51,76
0,43	0,00	0,00	10,00	1,11	21,11	1,45	31,45	1,54	41,54	3,50	53,50
0,44	0,00	0,67	10,67	2,00	22,00	2,36	32,36	3,63	43,63	7,06	57,06
0,45	0,00	2,22	12,22	3,54	23,54	4,22	34,22	6,05	46,05	10,58	60,58
0,46	0,32	5,55	15,55	8,88	28,88	10,62	40,62	13,31	53,31	18,82	68,82
0,47	2,05	8,32	18,32	14,65	34,65	17,70	47,70	22,02	62,02	25,87	75,87
0,48	26,14	30,19	40,19	32,08	52,08	32,33	62,33	36,30	76,30	37,63	87,63
0,49	54,28	54,32	64,32	55,50	75,50	57,04	87,04	57,16	97,16	58,08	108,08
0,5	80,00	80,00	90,00	80,00	100,00	80,00	110,00	80,00	120,00	80,00	130,00

Tabla A.10. Distribución Lineal de la temperaturas en una placa de EPS₂₀ de espesor 0,50m, en estado no estacionario, con condiciones de frontera no homogéneas ($T(0,0)=0^{\circ}\text{C}$ y $T(0,0.5)=80^{\circ}\text{C}$); para una difusividad térmica de $\alpha=2,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Fuente: Autora**

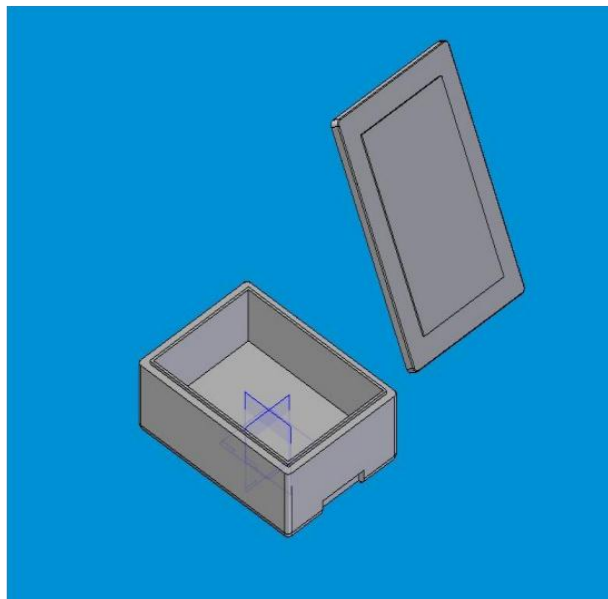
***Los datos de temperatura en los diferentes intervalos de tiempo de cada una de las placas de material estudiadas, fueron intencionalmente desplazados 10, 20, 30, 40 y 50°C respectivamente, con el fin de mejorar la visualización de los resultados.*

APPENDIX 2

B.1. Ficha Técnica Caja Multipropósito. Uso: Transporte de fruta



CAJA MULTIPROPÓSITO



Material:	Poliestireno Expandido - Icopor
Densidad :	20 – 25 Kilogramo/ m ³
Peso aprox.:	160 - 200 Gramos
Capacidad:	5 Kilos
Medidas internas:	Largo 358 Cm Ancho 245 Cm Alto 8 Cm
Medidas externas:	Largo 395 Cm Ancho 228 Cm Alto 13 Cm

Asesoría y Ventas: Carrera 29 No. 75 - 34

Bogotá D.C. – Colombia Teléfonos: (57) (1)6148784 - (57) (1)2582783

Planta de Producción: Vereda Canavita, Tocancipá (Cundinamarca)

B.2. Ficha Técnica Materia Prima. Poliestireno Expandible Ming Dih Industry Co., LTD



MING DIH INDUSTRY CO., LTD.

	GRADE	SIZE (m/m)	Recommended Exp. Density (g/cm ³)	PENTANE LEVEL	HUMIDITY	APPLICATION
GENERAL PURPOSE	SB	1.2-1.8	13-18	6.5-7.5%	< 1%	BLOCK, PLATE, LARGE PACKAGE
	S	0.9-1.3	14-20		< 1%	MEDIUM PACKAGE, FISH BOX
	S2	0.7-1.0	15-25		< 1%	THIN ITEM PACKAGE, FISH BOX
		S3	0.5-0.8		16-30	< 1%
FAST CYCLE	SB-211	1.2-1.8	13-18	6.5-7.5%	< 1%	BLOCK, PLATE, LARGE PACKAGE
	S-211	0.9-1.3	14-20		< 1%	MEDIUM PACKAGE
	S2-211	0.7-1.0	15-25		< 1%	THIN ITEM PACKAGE
	S3-211	0.5-0.8	16-30		< 1%	SMALL ITEM PACKAGE
FAST CYCLE	SB-112	1.2-1.8	13-18	6.5-7.5%	< 1%	BLOCK, PLATE, LARGE PACKAGE
	S-112	0.9-1.3	14-20		< 1%	MEDIUM PACKAGE
	S2-112	0.7-1.0	15-25		< 1%	THIN ITEM PACKAGE
	S3-112	0.5-0.8	16-30		< 1%	SMALL ITEM PACKAGE
LOW DENSITY (HIGH EXPANSION)	SB-217	1.2-1.8	13-18	7.0-8.0%	< 1%	BLOCK, LARGE PACKAGE
	S-217	0.9-1.3	14-20		< 1%	MEDIUM PACKAGE,
	S2-217	0.7-1.0	15-25		< 1%	THIN ITEM PACKAGE
	S3-217	0.5-0.8	16-30		< 1%	SMALL ITEM PACKAGE
LOW PENTANE	LSB	1.2-1.8	15-20	4.5-5.5%	< 1%	HELMET, PACKAGE
		LS	0.9-1.3		16-30	< 1%
	LS2	0.7-1.0	15-30		< 1%	HELMET, PACKAGE
		LS3	0.5-0.8		16-30	< 1%
SELF-EXTINGUISHING	FSM	0.9-1.3	13-20	5.5-7.5%	< 1%	LIGHT BLOCK
	FSB	1.2-1.8	15-25	5.5-6.5%	< 1%	LIGHT BLOCK
	FS1	0.9-1.3	16-25		< 1%	LIGHT BLOCK
	FS2	0.7-1.0	17-25		< 1%	HEAVY BLOCK, PACKAGE
		FS3	0.5-0.8		18-30	< 1%



PLASSOL S.A. CARRERA 43A N° 14-109 EDIFICIO NOVA TEMPO OF. 503 MEDELLIN - COLOMBIA - TEL: 268 27 94
 NIT. 800.102.065-9. FAX: 311 21 49 E-MAIL: plassol@plassol.com

B.3. Ficha Técnica del Equipo. Expansora 1



SISTEMA DE GESTIÓN –



TARJETA MAESTRA DEL EQUIPO

NOMBRE: EXPANSORA 1	CÓDIGOS: E1 E2	NUMERO EQUIPOS IGUALES: 2
DIMENSIONES (ANCHO, ALTO Y LARGO): 0.82 m X 5.51 m X 3.85 m		FABRICANTE: Henry García
CÓD. CONTABILIDAD: 15200201	VR DE COMPRA: \$ 10.200.703,24	PLANO:

PARTE MECÁNICA

MOTOR 1: MOTO REDUCTOR 1 Modelo: 1 LA 5 Serie: 112 - 4 YB 60 Fases: 3
 Frecuencia: 60 Hz Amperios: 17 Rodamientos: 6205 Potencia (H.P.): 5
 Voltios: 220 / 440 R.P.M. 1750 Función: Mueve el eje de la expansora 1

MOTOR 2: MOTO REDUCTOR 2 Modelo: MR90 H Serie: TF 100S Potencia (H.P.): 5
 R.P.M. Ent: 1750 R.P.M. Salida: 81.40 Función: Mueve el eje de la expansora 2

MOTOR 3: VENTILADOR 1 Modelo: 1 LA 3 Serie: 106 2 YB 60 Marca: Siemens
 Frecuencia: 60 Hz Fases: 3 Rodamientos: Potencia (H.P.): 4.8 R.P.M. 3470
 Voltios: 220 / 440 Función: Lleva el material expandido de expansora 1 a los silos

MOTOR 4: VENTILADOR 2 Modelo: B 112 MA 2 - EC Serie: 1296 Marca: Eberle
 Voltios: 220/440 Amperios: 15.6 - 7.8 Potencia (H.P.): 6 Rodamientos: 6306
 Peso: 40 Kg R.P.M. 3500 Función: Lleva el material expandido de expansora 2 a los silos

MOTOR 5: TRANSPORTADOR Marca: Siemens Modelo: 1 LA Serie: 2044 - 2 AA
 Voltios: 260 / 440 Amperios: 5.9 - 3.4 R.P.M. 3390 Potencia (H.P.): 2.4 Frecuencia: 60 Hz
 Rodamientos: 6205 Función: Lleva material molido de silo 1 a expansora 1

OTROS ELEMENTOS MECÁNICOS

PARTE	CANTIDAD	REFERENCIA
Desfogue	2	Parte de arriba 2", abajo 1 1/2"
Tanque	1	Capacidad de 1 1/2" m ³
Aspas móviles	9	Ambas expansoras
Aspas fijas	9	Expansora 2
Aspas fijas	7	Expansora 1
Tablero de control	2	Una válvula de aire y una de motores
Manómetro	1	1 - 30 psi
Llave de paso	2	1 1/2"
Visor de densidad	1	-
Llave de paso	1	2"
Cilindros neumáticos	2	Cierre de vapor y aire
Tolva	2	Uno para molido, uno material expandido
Sistema prensa estopa	2	-
Dosificador de scrap		
Silos: cono recolector	8	Material poliéster ref. 800, tejido tafetán; 3 m X 3 m de lado X 0.20 m de longitud
Silos: lona superior	8	Material poliacril tejido; 3 X 3 X 3 m de largo

B.4. Ficha Técnica del Equipo. Inyectora Automática 1. Lendle LA 90-70-20



SISTEMA DE GESTIÓN - C  X

TARJETA MAESTRA DEL EQUIPO

NOMBRE: INYECTORA AUTOMÁTICA 1	CÓDIGO: IA1 IA2	N° EQUIPOS IGUALES: 2
DIMENSIONES (ANCHO, ALTO Y LARGO): 1,6 m X 2,85 m X 2,5 m		FABRICANTE: ERICH LENDLE Y CO.
COD. CONTABILIDAD: 15200206	VR DE COMPRA: \$ 38,813,929.91	PLANO: 18520, 18509, 18531.0, 18531.1
CONSIDERACIONES GENERALES: Costo instalación plc: \$ 3,950,227.73; peso: 1600 Kg. Sin molde		
Marca: LENDLE Modelo: LA - 90 - 70 - 20		

PARTE MECÁNICA

MOTOR 1: MOTOBOMBA	Marca: Siemens	R.P.M. 3500	Potencia (H.P.): 12
Voltios: 220 / 440 Función: Refrigeración para todas las máquinas de inyección.			
MOTOR 2: MOTOBOMBA	Marca: Siemens	R.P.M.	Potencia (H.P.): 2.5
Voltios: 220 / 440 Función: Enfriamiento para todas las maquinas de inyección			
MOTOR 3: EXTRACTOR	Modelo: VFC 703 A	Serie: 90257271 YA 0.31	
Voltios: 220 / 260 Amperios: 5.6 - 10 Frecuencia: 60 Hz Potencia (H.P.): 6.7			
Rodamientos: Función: Saca vapor dentro de cámaras, llenado de cilindros desde tolva			

OTROS ELEMENTOS MECÁNICOS

PARTE	CANTIDAD	REFERENCIA
Cilindro neumático de llenado	1	120 mm diámetro; presión: 1.5 bar
Enclavamientos de seguridad	4	Para las cámaras
Entradas para inyectores	63	
Fierro hidráulico	1	Diámetro 4"
Válvulas reguladoras de vapor	2	2"
Válvulas reguladoras de agua	2	2"
Válvulas del cilindro	3	Paso de presión, aire y material
Indicador nivel de aceite	1	
Válvulas reguladoras de aire	2	2"
Cámaras	1 móvil 1 fija	Contiene 1 entrada de H2O y 1 de vapor y aire para c/u
Desfogues	2	3" cámara fija; 1½" cámara móvil
Filtro purificador de aire	2	
Válvulas de vacío	2	
Cheque de 1"	1	Paso de agua
Manómetros	4	0 -2.5 bares
Válvulas XX	2	1 en el cilindro, 1permite paso de MP

APPENDIX 3

C.1. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 0. Software Octave 3.6.4.

```

1 clear all
2 clc
3 close all
4 hold off
5 N=20;
6 L=0.5;
7 h=L/(N-1);
8 x=0:h:L;
9 T=zeros(N,1);
10 T(N)=80;
11 Tnueva=T;
12 plot(x,T);
13 alfa=0.0000000049;
14 deltat=300;
15 r=alfa*deltat/h^2
16 for instante=1:500
17 encabezado=strcat("GRAFICA EPS0 PARA EL INTERVALO DE
TIEMPO:",num2str(instante));
19 %En cada instante se quiere recorrer la
20 %Placa evaluando la temperatura
21 for nodo=2:N-1
22 Tnueva(nodo)=r*T(nodo-1)+T(nodo)*(1-2*r)+r*T(nodo+1);
23end
24 plot(x,Tnueva,'linewidth',4)
25 grid on
26 title(encabezado)
27 xlabel('Espesor L (m)')
28 ylabel('Temperatura (°C)')
29 pause(0.1)
30 T=Tnueva;
31 end

```

C.2. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 10. Software Octave 3.6.4.

```
1 clear all
2 clc
3 close all
4 hold off
5 N=20;
6 L=0.5;
7 h=L/(N-1);
8 x=0:h:L;
9 T=zeros(N,1);
10 T(N)=80;
11 Tnueva=T;
12 plot(x,T);
13 alfa=0.0000000062;
14 deltat=300;
15 r=alfa*deltat/h^2
16 for instante=1:500
17 encabezado=strcat("GRAFICA EPS10 PARA EL INTERVALO DE
TIEMPO:",num2str(instante));
19 %En cada instante se quiere recorrer la
20 %Placa evaluando la temperatura
21 for nodo=2:N-1
22 Tnueva(nodo)=r*T(nodo-1)+T(nodo)*(1-2*r)+r*T(nodo+1);
23end
24 plot(x,Tnueva,'linewidth',4)
25 grid on
26 title(encabezado)
27 xlabel('Espesor L (m)')
28 ylabel('Temperatura (°C)')
29 pause(0.1)
30 T=Tnueva;
31 end
```

C.3. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 15. Software Octave 3.6.4.

```
1 clear all
2 clc
3 close all
4 hold off
5 N=20;
6 L=0.5;
7 h=L/(N-1);
8 x=0:h:L;
9 T=zeros(N,1);
10 T(N)=80;
11 Tnueva=T;
12 plot(x,T);
13 alfa=0.0000000043;
14 deltat=300;
15 r=alfa*deltat/h^2
16 for instante=1:500
17 encabezado=strcat("GRAFICA EPS15 PARA EL INTERVALO DE
TIEMPO:",num2str(instante));
19 %En cada instante se quiere recorrer la
20 %Placa evaluando la temperatura
21 for nodo=2:N-1
22 Tnueva(nodo)=r*T(nodo-1)+T(nodo)*(1-2*r)+r*T(nodo+1);
23end
24 plot(x,Tnueva,'linewidth',4)
25 grid on
26 title(encabezado)
27 xlabel('Espesor L (m)')
28 ylabel('Temperatura (°C)')
29 pause(0.1)
30 T=Tnueva;
31 end
```

C.4. Código utilizado para obtener la distribución de temperaturas en régimen no estacionario del EPS 20. Software Octave 3.6.4.

```
1 clear all
2 clc
3 close all
4 hold off
5 N=20;
6 L=0.5;
7 h=L/(N-1);
8 x=0:h:L;
9 T=zeros(N,1);
10 T(N)=80;
11 Tnueva=T;
12 plot(x,T);
13 alfa=0.0000000028;
14 deltat=300;
15 r=alfa*deltat/h^2
16 for instante=1:500
17 encabezado=strcat("GRAFICA EPS20 PARA EL INTERVALO DE
TIEMPO:",num2str(instante));
19 %En cada instante se quiere recorrer la
20 %Placa evaluando la temperatura
21 for nodo=2:N-1
22 Tnueva(nodo)=r*T(nodo-1)+T(nodo)*(1-2*r)+r*T(nodo+1);
23end
24 plot(x,Tnueva,'linewidth',4)
25 grid on
26 title(encabezado)
27 xlabel('Espesor L (m)')
28 ylabel('Temperatura (°C)')
29 pause(0.1)
30 T=Tnueva;
31 end
```

GLOSARIO

Coefficiente de Poisson: Relaciona la deformación longitudinal y la deformación lateral de un material bajo tensión

Deformación elástica: Region en una curva de esfuerzo/deformación en la cual se suceden cambios permanentes al material (Newell, 2011: 73)

Deformación plástica: Region en una curva de esfuerzo/deformación en la cual el material ha experimentado un cambio del cual no se recuperara por completo (Newell, 2011:73).

Extrusión: Proceso continuo para fabricar productos intermedios a partir de materia prima recuperada o en mezcla con resina virgen. Por ejemplo, película láminas, tuberías y perfiles. (Directorio del reciclaje, Acoplásticos 2010)

Impacto ambiental: Es la alteración que se produce en el entorno, ocasionada por la ejecución de un proyecto, obra o actividad. (Decreto 1728 de 2002)

Inyección: Proceso de moldeo que permite la transformación de la materia prima recuperada o en mezcla con resina virgen, en un producto terminado. (Directorio del reciclaje, Acoplásticos 2010)

Material dúctil: Se puede deformar plásticamente sin romperse. . (Newell, 2011: 75).

Material frágil: Falla por completo al inicio de la deformación plástica. Estos materiales tienen graficas lineales de esfuerzo contra deformación. . (Newell, 2011: 75).

Módulo de elasticidad: La pendiente de la curva esfuerzo/deformación en la región elástica. Tambien llamado módulo de Young. . (Newell, 2011: 75).

Residuos plásticos Pos industria: Se refiere a los desechos plásticos procedentes de los procesos de fabricación tanto de la industria petroquímica como la de transformación, un ejemplo de estos son las tortas derivadas de los procesos de extrusión. Normalmente a este tipo de desperdicios se les denomina scrap; esta clase de material es más fácil de reciclar puesto que el material es más limpio y es homogéneo en su composición, y puede ser reutilizado sin contaminar el material virgen. (Directorio del reciclaje, Acoplásticos 2010)

Residuos plásticos Pos consumo: Residuo originado en las diferentes actividades de consumo cuando los productos, ya sean plásticos únicos o mezclas de plásticos entre si o con otros materiales, terminan el periodo de vida útil o pierden su utilidad. (Directorio del reciclaje, Acoplásticos 2010)

Resistencia a la conformación: Tensión en el punto de tracción entre las deformaciones elástica y plástica. (Newell, 2011: 73).

Resistencia a la tracción: Tensión aplicada a la fuerza más alta en una curva de esfuerzo de formación. (Newell, 2011: 73).

Resistencia a la ruptura: Tensión en la cual el material se rompe completamente durante el ensayo de tracción. . (Newell, 2011: 73).

Reutilización: Es la prolongación y adecuación de la vida útil de los residuos sólidos recuperados y que mediante procesos, operaciones o técnicas devuelven a los materiales su posibilidad de utilización en su función original o en alguna relacionada, sin que para ello requieran procesos adicionales de transformación. (Decreto 1713 de 2002)

Polímero: Toda sustancia constituida por moléculas que se caracterizan por la repetición (despreciando extremos finales, ramificaciones y otras irregularidades de relativamente menor importancia) de uno o más tipos e unidades monoméricas. Se trata de cadenas muy largas (o también redes) en las que muchos átomos están alineados uno junto a otro.[2]

Monómeros: Son sustancias químicas de bajo peso molecular capaces de reaccionar consigo mismo o con otras sustancias para formar un polímero

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pernet, G.(2011). Eco-materiales. La incidencia negativa de la construcción en el medio ambiente, Revista de Investigación Universidad América. 4(1). Pág.61-77
- [2] Consultado de <http://www.cempre.org.co/Documentos/Ficha%20Plástico.pdf> el 20 de agosto de 2012
- [3]EPS, Industry Alliance Packaging (2009), “Expanded Polystyrene Packaging Environmental Profile Analysis”. Consultado de http://www.epspackaging.org/images/stories/EPS_Environmental_Profile_Analysis_lores.pdf. El 5 de noviembre de 2012
- [4] Reyes F. y Figueroa A. (2008) Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Ed. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.
- [5] Perilla J. *Et al.* (1999). Mezcla de materiales poliméricos I. Evaluación de las mezclas de poliestireno virgen y reciclado. Revista Ingeniería e Investigación No. 44 Diciembre de 1999. Colombia. Pág. 80-83
- [6] Cheremisinoff N. (1996), POLYMER CHARACTERIZATION. Laboratory Techniques and Analysis. Ed. Noyes publications. Westwood, New Jersey
- [7] Seymour B. and Carraher E. (1995) Introducción a la química de los polímeros. Ed. Reverté S.A. Barcelona
- [8] Fred W. (2004). Ciencia de los polímeros. Ed. Reverté. España. Pág. 5
- [9] Rodriguez J., Castro L. y Real J. (2006) Procesos industriales para materiales metálicos. 2ª Edición. Ed. Visión net. Madrid. Pág. 34
- [10] Aguilar G. (2001) El hombre y los materiales. Editorial la ciencia para todos. México. 2ª Edición. Pág. 71-72
- [11] Yanés G. (2011). Propiedades térmicas de mezclas de LDPE y PP. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Pág. 13-17
- [12] Seymour C. (1995) Introducción a la Química de los polímeros. Ed Reverte. Barcelona
- [13] Saja J. *et. al.* (2005). Materiales Estructura, propiedades y aplicaciones. Thomson. Madrid-España.
- [14] Rodriguez J. *et. al.* (2006). Procesos industriales para materiales metálicos. Visión Net. 2ª edición. Madrid-España. Pág. 33-35

- [15] Cinta *et al.* (2006). Principales polímeros comerciales. Ed Universal politécnica de Valencia. Valencia. Pág. 39
- [16] Garay C. (2012). Encadenamiento productivo. Petróleo – petroquímicos - plásticos. Cartagena (Colombia) Pág. 2
- [17] Yavorski B.M. y Detla F. (1977). Manual de física. URSS. Ed. MIR. Moscú. Pág. 297-320
- [18] Almanza O.(2000), Caracterización y modelización de las propiedades térmicas y mecánicas de espumas con base polietileno, Universidad de Valladolid Tesis doctoral
- [19] Weininger J. y Stermitz F. (1988), Química organica. Ed. Reverté. España
- [20] Sempere J. y Tello E. (2007). El final de la era del petróleo barato. Ed. icaria. Barcelona
- [21] Tomado de <http://www.maremundi.com/hidrocarburos.asp?pg=3&id=6> el 25 de noviembre de 2014
- [22] Billmeyer F. (2004), Ciencia de los polímeros. Ed. Reverte. Barcelona España
- [23] Billmeyer F. (1984). Textbook of Polymer Science. 3ª edition. New york
- [24] Callister W. (1996), Materials Science Engineering. An Introduction. Third Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, U.S.A.
- [25] Norma ICONTEC 1359. (1978). Plásticos. Espumas rígidas de poliestireno expandido. Especificaciones. C16.78/77
- [26] Ramón C. y Ruiz M. (1988). Ingeniería de los Materiales Plásticos. Ed. Díaz de Santos. Madrid
- [27] Rapin P. y Jacquard P. (1997), Instalaciones frigoríficas. Vol 2. Ed. Marcombo S.A. Paris
- [28] Consultado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAIL.2.8.MECANICAS.Ensayos.pdf> el 25 de noviembre del 2014
- [29] Operator's Manual Differential Scanning Calorimeter DSC 2920 CE (1997)
- [30] Consultado de www.aislapor.com/empaques.html el 6 de octubre del 2013
- [31] Consultado de http://www.google.com.co/imgres?sa=X&biw=1366&bih=643&tbn=isch&tbnid=qybGyzBaWXEFxM:&imgrefurl=http://www.gruposistepanel.com/rellenos-y-compensaciones/&docid=X_e870q1Urf6GM&imgurl=http://www.gruposistepanel.com/wp-content/uploads/2013/02/nievek.jpg&w=600&h=200&ei=9UZcUqGnEYG69gSw1IDgBA&zoom=1&ved=1t:3588,r:14,s:0,i:119&iact=rc&page=1&tbnh=117&tbnw=354&start=0&ndsp=17&tx=206&ty=56 el 6 de octubre del 2013

- [32] Chávez D. (2012). Historia de los plásticos: desde los plásticos naturales hasta los diseñados a medida. Revista REIMAT. 1(1). Pág.51-53
- [33] Garrido L. *et al* (2004). Ciencia y tecnología de los materiales poliméricos. 1(1). Madrid
- [34] Richardson E. (2000). Industria del plástico. Ed. Paraninfo. Madrid
- [35] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). Sector plástico. Guías Ambientales. Bogotá Colombia. Pág. 15
- [36] Vicent y Alvarez. (2006). Ciencia y tecnología de polímeros. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. Pág. 13
- [37] Fred W. (2004). Ciencia de los polímeros. Ed. Reverté. España. Pág. 20
- [38] Brandrup *et al.* (1999). Polymer handbook. Fourth Edition. Ed. Wiley Interscience. United States of America.
- [39] León R. *Et al* (2007). Síntesis, caracterización y aplicación del PS entrecruzado a partir de residuos de PS. Revista Iberoamericana de polímeros. 8(2). Pág. 113
- [40] Fred W. (2004). Ciencia de los polímeros. Ed. Reverté. España. Pág. 20
- [41] Anuario estadístico de la petroquímica en Mexico (2007)
- [42] Consultado de <http://www.elespectador.com/impreso/negocios/articulo-300160-plastico-solido> el 1 de noviembre del 2012.
- [43] Consultado de <http://www.dextonsa.com/dexton-ps> el 31 de agosto del 2012
- [44] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). Sector plástico. Guías Ambientales. Bogotá Colombia. Pág. 120
- [45] Garay C. (2010). La industria Plástica en Colombia. Principales variables de su evolución 2007 -2009.
- [46] La Mantia, F. (2002). Handbook of plastics recycling. Rapra Techology Limitd. UK. Pág. 12
- [47] Samper, M.D. (2008) Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. Revista Redisa 24 Julio 2008. I simposio Iberoamericano de ingeniería de residuos. Pág. 23 – 24
- [48] Consultado de <http://www.iopp.org/files/public/IoPPSmallParcelShippingGuidelines.pdf> el 23 de octubre de 2012
- [49] Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Séptima edición. 2006
- [50] Stoner J. (1996). Administración. Ed. Pearson Educación. Sexta edición. México. Pág. 66

- [51] Ministerio ambiente, vivienda y desarrollo territorial (2004). Guía ambiental proceso básico de transformación de plásticos. Colombia.
- [52] Careaga J. (1993). Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes. Ed. SEDESOL. México D.F.
- [53] Castell X. (2000). Reciclaje de residuos industriales. Ed. Diaz de Santos S.A. España. Pág. 435
- [54] ANAPE (-----). Proyecto ECO EPS para el reciclado de envases y embalajes de poliestireno expandido usados. Consultado en <http://www.anape.es/pdf/eco-eps.pdf> el 11 de noviembre de 2015
- [55] AAPE (2005). Comportamiento al fuego del Poliestireno Expandido EPS. Consultado en http://www.aape.com.ar/biblioteca/Comportamiento_Fuego.pdf el 11 de noviembre del 2015
- [56] Subramanian P. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. Conservation and Recycling. Page 261
- [57] APC, *American Plastics Council*, (1998). Consultado de <http://www.Plasticsresource.com/> el 23 de octubre de 2012.
- [58] Marín S. *et al* (2011). Caracterización de Morteros con adición de residuos de poliestireno expandido y lana mineral. Jornadas de investigación. Ed. Escuela de ingeniería de Antioquia. Pág. 166
- [59] Gonzales J. (2005). Tesis doctoral: Caracterización de mezclas de resinas conglomeradas con yeso o escayola, su uso en la construcción. Pág. 26
- [60] Casado E y García J. (2004) Automoción: elementos amovibles y fijos no estructurales. España. Pág. 114.
- [61] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). Sector plástico. Guías Ambientales. Bogotá Colombia. Pág. 98
- [62] Patente (2008). Proceso para la elaboración de paneles para construcción a base de ICOPOR reciclado. Superintendencia de Industria y Comercio. Colombia. N° 78 Gaceta 593 Fecha: 2008/06/27
- [63] Consultado de http://ukinmexico.fco.gov.uk/resources/es/pdf/pdf1/SDD_Testimonio_Poliestireno el 12 de octubre de 2012
- [64] Marali G. y Gunther G. (____). Tratamiento fotooxidativo de aguas residuales de una empresa de producción de poliestireno. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México.
- [65] Consultado de <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/generan-icopor-biodegradable-a-partir-de-desechos-de-hongos/index.html> el 1 de noviembre del 2012

- [66] Consultado en http://www.elcolombiano.com/estudiantes_se_inventaron_un_icopor_biodegradable-PBEC_170096 el 11 de noviembre del 2015
- [67] Consultado en <http://www.ecovatedesign.com> el 11 de noviembre del 2015
- [68] Figueroa A. *et al* (2007). Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. Revista Épsilon N° 9. Bogotá. Julio- Diciembre. Pág. 41 - 55
- [69] Subramanian P. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. Conservation and Recycling. Page 257
- [70] Marin S. *et al* (2011). Caracterización de morteros con adición de residuos de poliestireno expandido y lana mineral. Jornadas de investigación EIA
- [71] González, F. (2005). Caracterización de mezclas de Poliestireno expandido conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción. Tesis Doctoral. Dirección: Joaquim Lloveras, M. Barcelona.
- [72] Consultado de <http://www.dart.biz> el 17 de agosto del 2012
- [73] Consultado de <http://www.aimsa.com/reciclado.htm> consultado el 1 de noviembre del 2012
- [74] Lopez A. (2004) Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas. Tesis doctoral. Universidad de Girona.
- [75] Albella, J. *et al* (1993). Introducción a la ciencia de materiales.
- [76] Newell J.,(2009).Ciencia de materiales. Aplicaciones en ingeniería. Editorial Alfaomega. Nueva Jersey, USA
- [77] Callister W. (2007).Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales 2. Ed. Reverte. España. Pág. 674 - 676
- [78] Ashby M. y Jones D. (2005). Engineering Materials I. An introduction to properties applications and design. Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford.
- [79] Salazar A. (2003). On thermal diffusivity. Eur. J. Phys 24. Pág. 351-358
- [80] Mano J. (2003). Propiedades térmicas de los polímeros en la enseñanza de la ciencia de materiales e ingeniería. Estudios DSC sobre Poli (Tereftalato de Etileno). Journal of Materials Education Vol.25 (4-6). México. Pág. 161-164
- [81] Incropera F. y De witt D. (2003). Fundamentos de transferencia de Calor. Ed._Pearson. Prentice Hall. Pág. 3
- [82] Silvertein R. and Webster F. (1998). Spectrometric Identification of Organic Compounds, 6a ed. John Wiley & Sons, New York.
- [83] Consultado en <http://www.ehu.eus/imacris/PIE06/web/IR.htm> el 20 de julio 2013

- [84] Hollas J. (1992). Modern Spectroscopy, John Wiley & Sons, 2nd ed. Chichester, England.
- [85] Macho S. (2002). Metodologías analíticas basadas en espectroscopia de infrarrojo y calibración multivariante. Aplicación a la industria petroquímica. Universitat Rovira. Tesis Doctoral. Tarragona. Pág. 21-25
- [86] Rubinson K y Rubinson J. (2001). Análisis instrumental. Ed Pearson Educación. Madrid.
- [87] Norma ASTM C177-10
- [88] Norma ASTM 4812-11
- [89] Chapra (2010). Métodos numéricos para ingeniería. Ed. Mc Graw Hill
- [90] Norma ASTM D1621-10
- [91] Norma ASTM D7557-09
- [92] Benito B. (2001). Apuntes de historia de la química industrial en México. Journal of the Mexican Chemical Society. 45 (3). Pág.136 – 142.
- [93] INSTITUTO MEXICANO DEL PLÁSTICO (2000). Enciclopedia del Plástico, Tomo 4, México D.F.
- [94] Cinta M.,Alvares S., Saragoza J (2006), Principales polímeros comerciales, Ed Universidad Politécnica de Valencia. Pág. 39-41
- [95] Cinta M., Alvares S., Saragoza j (2006), Ciencia y tecnología de polímeros, Ed Universidad poltecnica de Valencia. Pág. 14
- [96] Consultado de <http://books.google.com.co/books?id=nrLSqjbHEl0C&printsec=frontcover&dq=ingenieria+de+materiales&hl=es-419&sa=X&ei=UOtUq6ZGOM-2QWqpoGwBg&ved=0CD4Q6AEwAw#v=onepage&q&f=false> el 5 de octubre del 2013
- [97] Martínez P. (1972) Química y física de los altos polímeros y materias plásticas. Ed. Alhambra. Madrid. Pág. 118-119
- [98] Consultado http://enciclopedia.us.es/index.php/Ensayo_de_resiliencia
- [99] Rougeron C. (1977). Aislamiento acústico y térmico en la construcción. Ed. Técnicos asociados S.A. Barcelona. Pág. 74
- [100] Klages F. (1968). Tratado de química organica. Ed. Reverté, s.a. España. Pág. 225–226. Consultado en <https://books.google.com.co/books?id=J0eF8gxxyoUC&pg=PA208&lpg=PA208&dq=moleculas+filiiformes&source=bl&ots=I7ppkIjNND&sig=WQsfCOE6ywDStHuO5vaSSo5gcVo&hl=es-419&sa=X&ved=0CB8Q6AEwAGoVChMIk6fq1MT0xwIVSyweCh1T8Ai1#v=onepage&q=moleculas%20filiiformes&f=false>

[101] Schwedt G. (1997). The essential guide to analytical chemistry, John Wiley & Sons, Chichester.