

**ELABORACIÓN Y EVALUACION DE MATERIALES COMPUESTOS A PARTIR
DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO Y MADERA**

**LUISA MARINA ORTIZ GÓMEZ
CRISTINA ISABEL ROJAS MARCONI**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**ELABORACIÓN Y EVALUACION DE MATERIALES COMPUESTOS A PARTIR
DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO Y MADERA**

**LUISA MARINA ORTIZ GÓMEZ
CRISTINA ISABEL ROJAS MARCONI**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERAS QUÍMICAS**

**DIRECTOR
GIOVANNI MORALES MEDINA
Ingeniero Químico, Dr.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

A Dios, por darme salud, sabiduría, paciencia y fe para culminar con éxito esta etapa.

A mi mami Eliana Sofía Gómez, por ser mi apoyo incondicional, por su perseverancia, su amor, comprensión y confianza, por sus buenos consejos y palabras de aliento. Por enseñarme el valor de la responsabilidad, el respeto, la honestidad y la equidad.

A mi abuela Myriam Gómez Fouar, por su cariño, por consentirme y apoyarme durante toda mi vida. Por ser mi segunda mamita.

A mi padre Rosendo Ortiz Velásquez, por su apoyo y buenos consejos, por motivarme a salir adelante siendo una persona de bien.

A mi hermano Juan Manuel Ortiz Gómez, por ser mi compañía, por amarme y por enseñarme a luchar por mis metas e ideales.

A Dante Johan Bayona Meneses, por enseñarme a ser una persona positiva y a creer en mis habilidades, por enseñarme el valor de la humildad y la responsabilidad, por su amor y compañía.

A Azucena Sánchez y a mi hermana Diana Ortiz Sánchez, por su cariño y acogida en su morada.

A María Alejandra Álvarez, por su valiosa amistad, sus consejos, su apoyo y confidencialidad.

*Y a todos aquellos que han contribuido en el desarrollo de este sueño, solo me resta decirles...
Gracias.*

Luisa Marina Ortiz Gómez.

A Dios por su infinito amor y bondad, por brindarme salud, paciencia y determinación para culminar esta etapa.

A mi mami Martha Marconi Quintero, por tanto esfuerzo y apoyo, por su confianza incondicional y principalmente por su amor. Ser su hija es mi orgullo y mayor bendición.

A mi hermana Martha Karina Sanjuan Marconi, por sus valiosos consejos, su apoyo incondicional, por ser mi ejemplo de perseverancia y disciplina.

A mi abuela Bertha Quintero, por su oración incansable, sus consejos y cariño permanentes.

A Rafael Quintero Villamizar, por ser mi alegría y fortaleza, por enseñarme el valor de la tranquilidad y la entrega, por tanto amor y paciencia.

A la memoria de mi abuelo Rodrigo Marconi, el hombre más maravilloso de mi mundo.

Cristina Rojas Marconi

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas las bendiciones recibidas y por permitirnos llegar satisfactoriamente al culmen de esta etapa de nuestras vidas.

A la Universidad Industrial de Santander, y en particular a la Escuela de Ingeniería Química, por brindar los conocimientos y las capacidades profesionales y personales para afrontar los retos venideros.

Al profesor Giovanni Morales por su confianza, su orientación y acompañamiento, y por compartir sus conocimientos y experiencias.

A Don Eduardo Carreño, Don Wilson Carreño y Don Guillermo Acero, su colaboración fue indispensable para la realización del proyecto, muchas gracias por recibirnos siempre con la mejor disposición.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	18
2.1. MATERIALES PLÁSTICOS.....	18
2.2. POLIESTIRENO	18
2.3. TÉCNICAS DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO	19
2.4. DESGASIFICACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO	19
2.5. ASERRÍN.....	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1. ETAPA I	21
3.1.1. Matriz polimérica.....	21
3.1.2. Tamizado del material de refuerzo	22
3.1.3. Selección de las variables de proceso.....	22
3.2. ETAPA II	22
3.2.1. Elaboración de probetas para pruebas mecánicas.....	22
3.2.2. Pruebas mecánicas.....	22
3.2.3. Análisis infrarrojo y DSC.	23
3.3. ETAPA III	23
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
4.1. RESULTADOS FTIR.....	25
4.2. RESULTADOS DSC	29
4.2.1. Capacidad calorífica.....	32
4.3. RESULTADOS PRUEBAS MECÁNICAS.....	34
4.3.1. Ensayo de Tensión.....	34
4.3.2. Ensayo de Impacto.....	37
4.3.3. Ensayo de compresión	40

5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	53

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Estireno monómero	18
Figura 2: Metodología.....	21
Figura 3. FTIR poliestireno expandido post-consumo	25
Figura 4. Poliestireno desgasificado en el medio 1 comparado con poliestireno post-consumo.	27
Figura 5. Poliestireno desgasificado en el medio 2 comparado con poliestireno post-consumo.	27
Figura 6. Poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín comparado con aserrín	28
Figura 7. Poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín comparado con aserrín	28
Figura 8. DSC poliestireno expandido.....	29
Figura 9. DCS poliestireno desgasificado en el medio 1	30
Figura 10. DSC poliestireno desgasificado en el medio 2.....	30
Figura 11. DSC poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín	31
Figura 12. DSC poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín	31
Figura 13. Capacidad calorífica del poliestireno desgasificado en mezcla	34
Figura 14. Capacidad calorífica del poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de 30% aserrín	34
Figura 15. Resistencia a la tensión de poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín	36
Figura 16. Resistencia a la tensión de poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín	36
Figura 17. Resistencia al impacto de poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín	39
Figura 18. Resistencia al impacto de poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín	39
Figura 19. Resistencia a la compresión de poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín	42
Figura 20. Resistencia a la compresión de poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín.....	42

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de elaboración de las muestras	24
Tabla 2. Absorción de medio hidrocarbonado durante la desgasificación de 60 g de PE.	24
Tabla 3. Picos característicos de poliestireno expandido post-consumo teórico y experimental	25
Tabla 4. Picos característicos del medio hidrocarbonado 2.....	26
Tabla 5. Picos representativos y Temperatura de transición vítrea	32
Tabla 6. Capacidades caloríficas estimadas	33
Tabla 7. Resultados de resistencia a la tensión del material.....	35
Tabla 8. Propiedades y aplicaciones de materiales termoplásticos	37
Tabla 9. Resultados de resistencia al impacto del material	38
Tabla 10. Resistencia al impacto de materiales poliméricos	40
Tabla 11. Resultado de la resistencia a la compresión del material.....	41
Tabla 12. Resistencia a la compresión de materiales termoplásticos.....	43

LISTADO DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Capacidad calorífica de la muestra	32

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Técnicas de caracterización	53
ANEXO B. Ensayos mecánicos	54
ANEXO C. Normatividad ambiental para el manejo de plásticos	55
ANEXO D. Métodos de preparación Etapa I.....	56
ANEXO E. Evidencia fotográfica.....	57
ANEXO F. FTIR teórico de poliestireno expandido	60
ANEXO G. Resultados FTIR	61
ANEXO H. Resultados DSC.....	63
ANEXO I. Capacidad calorífica del poliestireno expandido.....	66
ANEXO J. Resultados pruebas de tensión	66
ANEXO K. Resultados pruebas de impacto	67
ANEXO L. Resultados pruebas de compresión	67
ANEXO M. Porcentajes de compresión.....	68

INTRODUCCIÓN

El poliestireno expandido (PE) es un material termoplástico rígido fabricado a partir del moldeo de perlas pre-expandidas de poliestireno [1]. Por sus características moleculares y de fabricación, el PE presenta una estructura celular cerrada, con un 98% de su volumen saturado con aire [2], lo cual explica su alta resistencia al impacto, baja conductividad térmica, propiedades de aislamiento acústico y absorción de agua casi nula [3]. Por lo anterior, el PE es utilizado en los sectores de la construcción y arquitectónico, de embalaje, de envasado y del sector decorativo, por lo que frecuentemente se encuentra relacionado con productos alimenticios, eléctricos, electrónicos y de enseres. La producción mundial de plásticos para el 2010 fue de 265 KTon [4], y se estima que ca. 70% de los residuos plásticos a nivel mundial corresponden a polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilo y poliestireno. De otro lado, el mercado mundial de poliestireno para el 2014 reportó transacciones del orden de \$ 32 billones de dólares, y se espera que para el 2020 presente un crecimiento de aproximadamente 4.5% [5]. Asimismo, en términos de volumen, el mercado de poliestireno se situó en 17.5 millones de toneladas en el 2014 [5].

La alta demanda de PE presenta un reto para la generación de opciones sobre su reciclado, descomposición o disposición final. La literatura reporta que aproximadamente el 80% del PE es depositado en rellenos o vertederos a cielo abierto, el 8% es incinerado y tan solo el 7% es reciclado [6]. El impacto ambiental que generan los rellenos y vertederos de post-consumo de PE conducen a la limitación de espacio ya que su tiempo de degradación se encuentra entre 100 y 1000 años [7]; asimismo, la incineración del PE libera compuestos bromados introducidos en su estructura durante su moldeo que pueden conducir a la generación de sustancias tóxicas [3], causando un impacto ambiental severo. Por lo anterior, las organizaciones ambientales y gubernamentales han dirigido sus esfuerzos en la promoción de técnicas de reutilización y en investigaciones tendientes al aprovechamiento de estos residuos en la generación de materiales derivados, evitando así el desaprovechamiento de oportunidades de mejoras ecológicas y beneficios económicos [8, 9, 10, 11, 12, 13]

Entre los métodos para el reciclado y reuso del PE figuran: reducción de volumen mediante el uso de cilindros giratorios calientes y posterior trituración y reutilización [14], obtención de nanofibras mediante electrohilado usando solventes naturales [15], obtención y caracterización de compuestos a base de poliestireno expandido y harina de madera [16]; disolución con limoneno como alternativa ecológica para el uso de barnices para acabados de superficies en madera [17], desarrollo de cementos livianos con EPS como agregado [18], y la desgasificación y el posterior moldeo térmico [19]. Este último método, permite la generación de un material con uso potencial en la construcción de mobiliario urbano [19]; adicionalmente, la desgasificación envuelve el uso de un líquido

con requerimientos de disposición final, como el aceite de cocina, con lo cual es posible contribuir al tratamiento concomitante de dos residuos urbanos. Sin embargo, este medio de calentamiento repercute en propiedades indeseables para el PE desgasificado, por lo que otros sistemas hidrocarbonados son requeridos para mejorar el material derivado del proceso.

De otro lado, el proceso productivo de los aserraderos genera ca. 43% de residuos en la operación de descortezar el árbol para sacar la madera verde; el 11% de estos residuos es utilizado en galpones, mientras el 32% restante no tiene un uso común y debido a su gran volumen y alto costo de transporte ocasiona un alto desperdicio y contaminación ambiental [20]. Estos residuos sin uso pueden contribuir en la formación de un material compuesto con el PE, tal como lo sugieren Sarmiento, *et al* [19].

El presente documento describe una metodología experimental novedosa para la preparación de un material compuesto a partir de los residuos de PE y los residuos de madera, utilizando el procedimiento de desgasificación en dos medios hidrocarbonados. Con lo anterior, la escuela de Ingeniería Química de la UIS contribuye con la búsqueda de soluciones ambientales para el manejo de residuos sólidos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar las propiedades estructurales y mecánicas de materiales compuestos elaborados a partir de residuos de poliestireno expandido y madera.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener poliestireno desgasificado utilizando un tratamiento térmico en un medio hidrocarbonado.
2. Evaluar las propiedades mecánicas y estructurales de los materiales compuestos sintetizados.
3. Determinar el procedimiento más adecuado para la elaboración de materiales compuestos a partir de los residuos de poliestireno desgasificado y madera.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

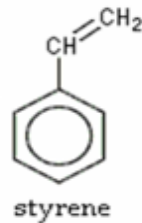
2.1. MATERIALES PLÁSTICOS

Están formados por cadenas largas de moléculas orgánicas, con repetición de una estructura mínima denominada monómero. Estructuralmente, la mayoría de los materiales poliméricos son no cristalinos, pero algunos constan de mezclas de regiones cristalinas y no cristalinas. Son buenos aislantes eléctricos y en general tienen bajas densidades y bajas temperaturas de reblandecimiento o descomposición [6]. Entre los plásticos, se encuentran los de tipo termoplástico, los cuales, por encima de una cierta temperatura presentan fluidez espontánea [21]. Por lo anterior, para su formación se requiere la aplicación de calor previo al enfriamiento, lo cual les confiere la forma definitiva. Pueden ser recalentados y reformados varias veces sin sufrir cambios significativos en sus propiedades [6]. Un ejemplo de un material termoplástico corresponde al poliestireno.

2.2. POLIESTIRENO

El estireno es uno de los intermediarios químicos de mayor valor comercial y de gran consumo en la actualidad; además es uno de los monómeros más importantes en la producción de polímeros como resinas, cauchos sintéticos y plásticos [6].

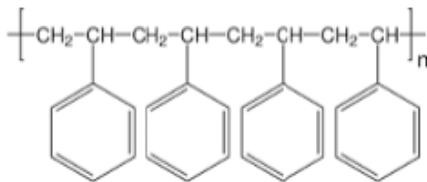
Figura 1: Estireno monómero



Fuente: ÁLVAREZ, R. A.; CRUZ, R. L. y MENDOZA, G. [22]

La polimerización del estireno genera al poliestireno (Figura 2). El proceso de polimerización del estireno es guiado por la formación de radicales libres [6].

Figura 2: Estructura del poliestireno.



Fuente: ARCHILA PRADA, Nathaly y RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Lady Carolina. [6]

La formación de poliestireno expandido (PE) se produce por la inyección de pentano a la matriz polimérica de poliestireno [23]. El PE se caracteriza por una estructura que contiene 98% de gas en volumen por lo cual exhibe propiedades de rigidez y dureza, baja conductividad térmica, alta resistencia al impacto y resistencia a la disolución y descomposición ante una amplia gama de compuestos químicos [19]. Por lo anterior, el PE es ideal como material de embalaje para muchos tipos de mercancías, así como, útil para aplicaciones de construcción.

2.3. TÉCNICAS DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

Los tratamientos más usados para el aprovechamiento del poliestireno de desecho están definidos como: primario, secundario, terciario y cuaternario [4]. El reciclado primario consiste en operaciones mecánicas para obtener un producto de propiedades físicas y químicas similares al material original. Este tipo de reciclaje se logra con los residuos postindustriales, libres de contaminación [7]. En el reciclado secundario los desechos son transformados en productos de diferentes formas por medio de la elevación de la temperatura. Esta tecnología es la más usada hasta ahora, particularmente en la industria de automóviles [4]. El reciclado terciario corresponde al reciclado químico, el cual por medio de reacciones químicas genera materia prima útil para la obtención de nuevos compuestos [4]. El reciclado cuaternario consiste en la incineración del material para recuperar energía debido a su elevado poder calorífico [4]. Este método tiene la ventaja de reducir el espacio ocupado en los rellenos sanitarios, sin embargo genera problemas con impacto ambiental [7].

2.4. DESGASIFICACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

El proceso de desgasificación corresponde a un reciclado de tipo secundario y comprende la pérdida de la estructura expandida del material por medio del calentamiento del PE en un medio líquido o gaseoso. Este método es uno de los más económicos y eficientes para el reciclado de PE, ya que se logra una reducción de

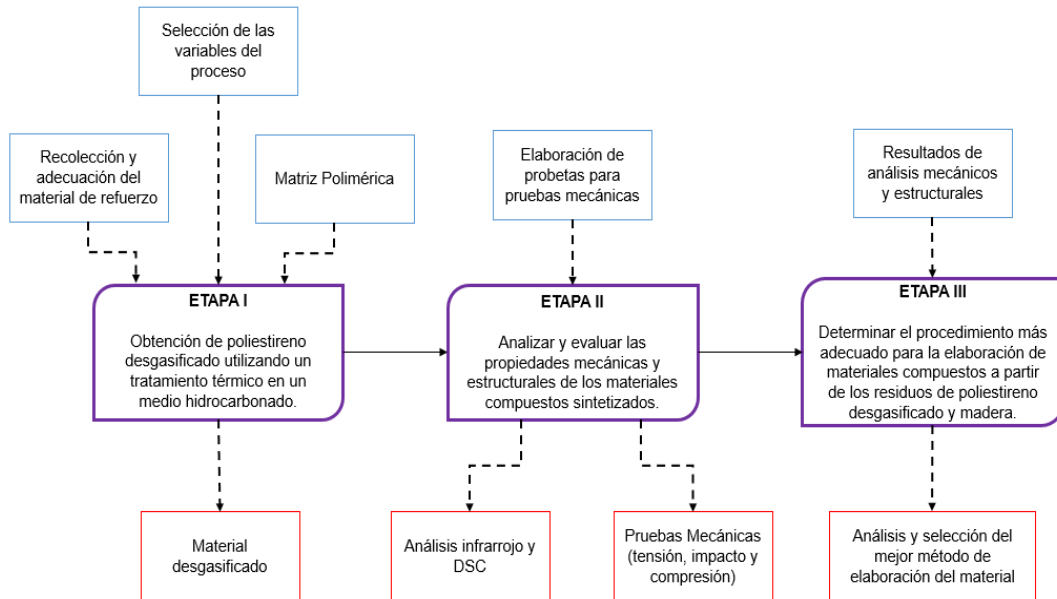
volumen de más de 100 veces sin generar degradación de las cadenas poliméricas [24]. En los últimos años se han reportado diferentes medios de calentamiento, dentro de los cuales se encuentran el carbonato de dimetilo y el butanol [3] el tetrahidrofurano (THF) y el etilenglicol [25]; limoneno, dimetil succinato y carbonatos de dialquilo [26], Recientemente, se ha propuesto el uso de aceite de cocina de desecho [19], sin embargo, el material generado presenta propiedades indeseables, debido a la generación de olores y acumulación de grasa en su superficie.

2.5. ASERRÍN

Derivado de las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, especialmente el aserrío, y que por lo general no se considera como material primario para la fabricación de pasta debido a su diminuto tamaño, aunque resulta aceptable para la fabricación de tableros de partículas [27]. Los autores Poletto Mathews, *et al.* reportan los resultados más relevantes del procedimiento de la formación de un material compuesto a partir de aserrín y PE [16]; dichos autores realizan la desgasificación del poliestireno mediante cilindros rotatorios calientes y su unión con el aserrín se lleva a cabo en una extrusora de doble tornillo, sin embargo para mejorar las propiedades mecánicas del material adicionan estireno anhídrido maleico (SMA), obteniendo materiales de altas propiedades mecánicas y baja densidad.

3. METODOLOGÍA

Figura 2: Metodología



3.1. ETAPA I

En esta etapa se considera el desarrollo del procedimiento experimental del proyecto, en el cual se implementan dos métodos diferentes para la elaboración del material compuesto, con el objetivo de evaluar su incidencia sobre las propiedades mecánicas del mismo. El primer método consiste en la incorporación del aserrín durante el proceso de desgasificación del PE y en el segundo método el material de refuerzo se mezcla con la matriz polimérica durante la molienda (Ver Anexo D).

3.1.1. Matriz polimérica: Se recolectan aproximadamente 5 Kg de PE y se hace una reducción de tamaño de forma manual. Para la desgasificación se utilizan dos medios hidrocarbonados de fácil consecución y bajo costo como medio de calentamiento. Con esto, el proceso presenta economía, la cual puede garantizar el escalado del mismo a nivel piloto. Se propone el uso de los siguientes disolventes:

- Medio hidrocarbonado 1: Mezcla de hidrocarburos saturados de cadena lineal que presenta ciertas características físicas como lo son impermeabilidad, brillantez,

biodegradable, aislante, además, exhibe consistencia sólida a temperatura ambiente [28].

- Medio hidrocarbonado 2: Compuesto relativamente rico en ácidos grasos de cadena impar, presenta una temperatura de fluidización superior a los 40°C y contiene un 77% aproximado de componente graso. [29]

3.1.2. Tamizado del material de refuerzo: El aserrín solo es tamizado en malla número 4, retirando las partículas de mayor tamaño. Con esto se puede garantizar una mejor distribución del aserrín en la matriz polimérica.

3.1.3. Selección de las variables de proceso: Para la preparación de las muestras por los dos procedimientos descritos anteriormente, el volumen del medio de calentamiento (30 mL) y la temperatura de operación (140°C) son fijados durante la desgasificación del PE. La matriz polimérica se refuerza con diferentes proporciones de aserrín durante la desgasificación o en la molienda, según el procedimiento de preparación, generando diferentes materiales compuestos.

3.2. ETAPA II

3.2.1. Elaboración de probetas para pruebas mecánicas: Las muestras previamente preparadas, son llevadas a una prensa hidráulica para ser quebradas y posteriormente a un molino de cuchillas para realizar una reducción de tamaño, y de esta forma facilitar su posterior moldeo. El moldeo se hace por medio de una prensa en caliente a 150 °C y una presión de 50 Kg/cm²; en estas condiciones el material compuesto exhibe la plasticidad adecuada para la elaboración de las probetas.

Las dimensiones de las probetas se ajustan a los requerimientos de las normas ASTM para ensayos mecánicos en materiales poliméricos –para pruebas de impacto la norma D6110 (ISO 179-1), para pruebas de tensión la norma D638 y para pruebas de compresión la norma D695–.

3.2.2. Pruebas mecánicas: Las pruebas de tensión y compresión fueron efectuadas en un equipo HSM 58 *Universal Material Tester* (20 KN), mientras que las pruebas de impacto fueron desarrolladas en un equipo HSM 41 *Pendulum Impact Tester* (25 J).

3.2.3. Análisis infrarrojo y DSC: Con estas pruebas se verifica si existe alguna interacción química entre los materiales compuestos, así como los puntos de transición vítrea, cristalizaciones y puntos de fusión. Los análisis fueron aplicados por medio de los equipos SHIMADZU 8400 S e IR *Tracer* 100 para los análisis FTIR, y del equipo DSC TA *Instrument* MOD Q-10 para los análisis de calorimetría (nitrógeno como gas inerte y temperatura máxima 440 °C).

3.3. ETAPA III

Se realiza el análisis estructural y mecánico del material sintetizado, a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de compresión, impacto, tensión, infrarrojo y DSC, previamente realizadas al material en sus diferentes porcentajes de refuerzo.

Finalmente, parte del comportamiento mecánico, es comparado con diferentes polímeros, de modo que se pueda concluir con la escogencia del mejor medio de calentamiento y método de obtención del material.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan las condiciones a las cuales se prepararon las muestras de la matriz polimérica y matriz polimérica reforzada en los diferentes medios de calentamiento. Estas muestras fueron caracterizadas mediante espectrometría infrarroja (FTIR) con el fin de evaluar las interacciones químicas y por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para establecer su comportamiento térmico.

Todas las muestras fueron preparadas en un volumen de disolvente de 30 mL a una temperatura de 140 °C. Se sintetizaron muestras reforzadas con aserrín al 15 y 30% sobre la cantidad de poliestireno presente, usando el método de refuerzo durante el proceso de desgasificación.

Tabla 1. Condiciones de elaboración de las muestras

Muestra	Medio	Cantidad de poliestireno [g]	Cantidad de aserrín [g]
1	1	10.53	-
2	2	10.70	-
3	Mezcla	10.79	-
4	1	7.03	3.00
5	2	7.02	3.00
6	Mezcla	7.02	3.00

El PE presentó incorporación del medio de calentamiento debido a la afinidad entre sus estructuras y al proceso del movimiento alrededor de enlaces sencillos con el cambio a la forma desgasificada. El porcentaje de incorporación según el medio fue determinada mediante la masa ganada después de la desgasificación de una muestra de PE de 60 g. Los resultados son mostrados en la Tabla 2. Según esta tabla, el medio de desgasificación 2 presenta mayor afinidad que el medio 1; el medio 2 presenta estructuras de ácidos grasos, (principalmente C₁₆ a C₁₈), mientras que el medio 1 presenta una naturaleza apolar. La afinidad del medio 2 puede ser explicada por la interacción de tipo donador-receptor π , en donde los anillos aromáticos del PE donan electrones y la parte polar de los ácidos grasos (CO) recibe electrones [30].

Tabla 2. Absorción de medio hidrocarbonado durante la desgasificación de 60 g de PE.

Medio	Peso poliestireno desgasificado [g]	Peso ganado [g]	Porcentaje de disolvente absorbido
1	79.96	19.96	33.27%
2	85.45	25.45	42.42%
Mezcla	81.49	21.49	35.82%

4.1. RESULTADOS FTIR

La Figura 6 presenta el espectro IR (FTIR) de una muestra del PE utilizado para la elaboración del material compuesto. En la tabla 3 se muestra la relación vibración y picos del espectro para el poliestireno, lo cual se encuentra en concordancia con lo reportado en la literatura (ver Anexo F).

Figura 3. FTIR poliestireno expandido post-consumo

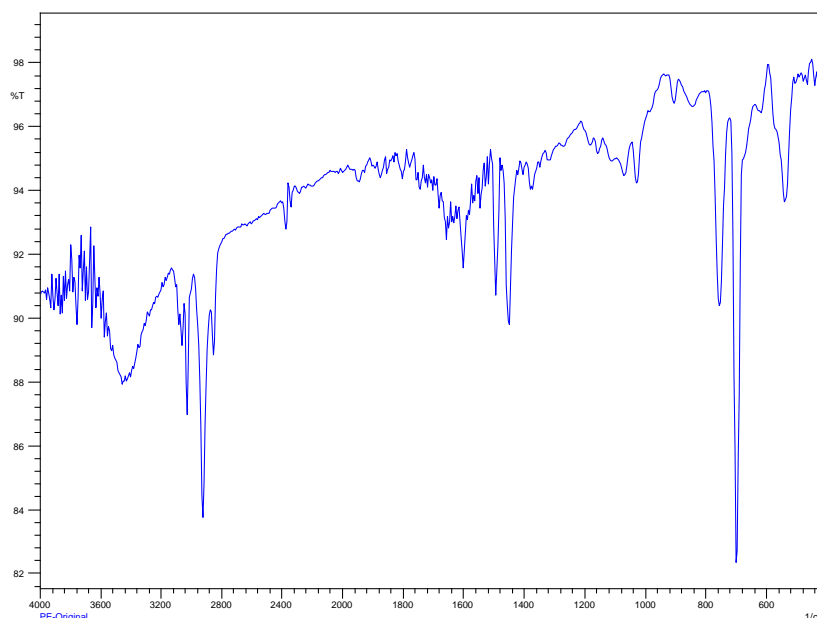


Tabla 3. Picos característicos de poliestireno expandido post-consumo teórico y experimental

Número de onda teórico [cm ⁻¹]	Número de onda experimental [cm ⁻¹]	Tipo de vibración
2918	2900	Estiramiento de las moléculas CH ₂ .
1599	1600	Vibración de tensión del esqueleto aromático.
1491	1485	Deformación tijera del CH ₂
1450	1440	Tensión del enlace -C=C- del anillo aromático (conjugación con el anillo).
746	760	=C-H banda debido a la flexión fuera del plano.
693	700	Flexión fuera del plano CH.

Para el medio hidrocarbonado 1 (ver Anexo G, figura 36) los picos más relevantes se presentan en números de onda de 2900, 1480 y 760 cm⁻¹, respectivamente. En la tabla

3 se presenta los valores que representan variaciones de las estructuras CH₂, las cuales se encuentran en gran proporción en el medio hidrocarbonado 1. Para el medio 2 (ver Anexo G, figura 37) no se cuenta con una base teórica, por lo tanto, el análisis de su estructura se hace a partir de tablas estándar de lectura de FTIR, obteniendo los resultados descritos en la tabla 4.

Tabla 4. Picos característicos del medio hidrocarbonado 2

Número de onda [cm ⁻¹]	Tipo de vibración
2840	Estiramiento de las moléculas de CH ₂
2900	
1740	Estiramiento del grupo carbonilo, grupo terminal éster
1450	Deformación en tijera del CH ₂
1180	Torsión del grupo carbonilo
720	Vibración de las moléculas de CH ₂

Para el PE desgasificado y el material compuesto, como sugieren las Figuras 7-10 y el Anexo G (figura 39), la estructura molecular del PE se conserva después del proceso, con aumentos en los picos referentes al medio de calentamiento y al aserrín. Con esto, la desgasificación en los medios de calentamiento y la incorporación del aserrín no envuelven reacciones químicas, conduciendo a una mezcla entre los componentes. Este resultado coincide con los reportes de Sarmiento *et al.* [19].

De otro lado, la cantidad de medio hidrocarbonado incorporado al sólido es inferior a la reportada utilizando otros medios de calentamiento. Sarmiento *et al.* [19] mencionan una cantidad importante de aceite en el sólido resultante de la desgasificación de poliestireno en aceite de cocina usado; estos autores aplicaron la extracción *Soxhlet* para retirar el exceso de aceite y evitar un sólido con propiedades físicas indeseables. Lo anterior sugiere que los ángulos de contacto entre los medios de calentamiento utilizados en el presente trabajo y el poliestireno son menores que el correspondiente a aceite de cocina y poliestireno; esto puede deberse a la estructura de ácidos que posee el aceite y a la intensidad de la interacción donador-receptor π .

Figura 4. Poliestireno desgasificado en el medio 1 comparado con poliestireno post-consumo

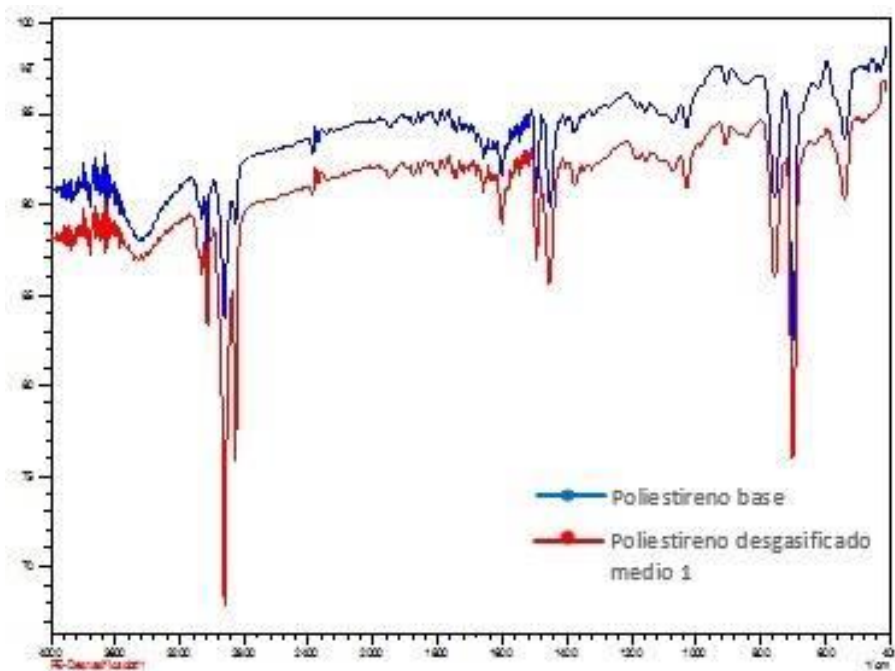


Figura 5. Poliestireno desgasificado en el medio 2 comparado con poliestireno post-consumo

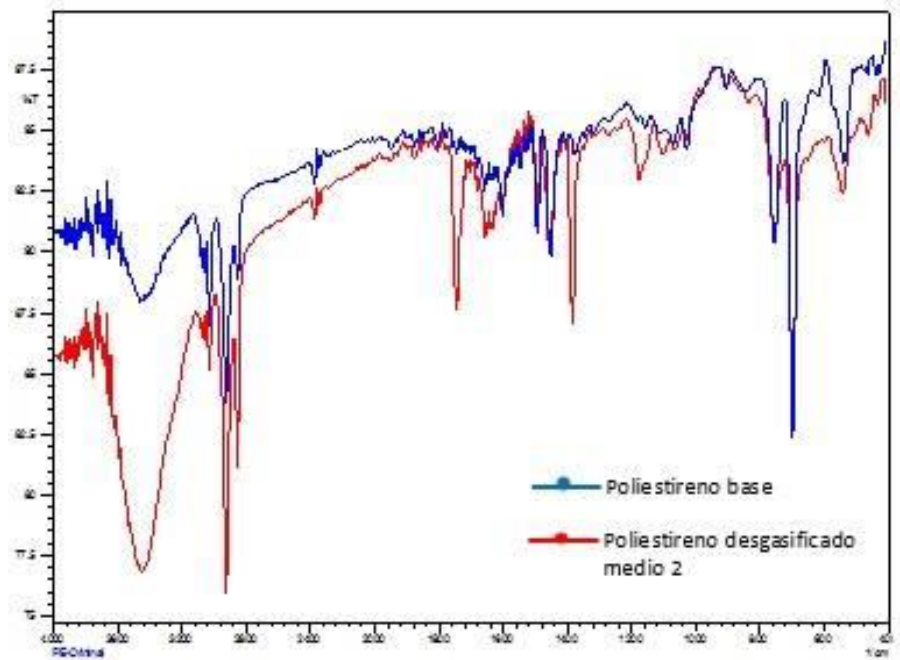


Figura 6. Poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín comparado con aserrín

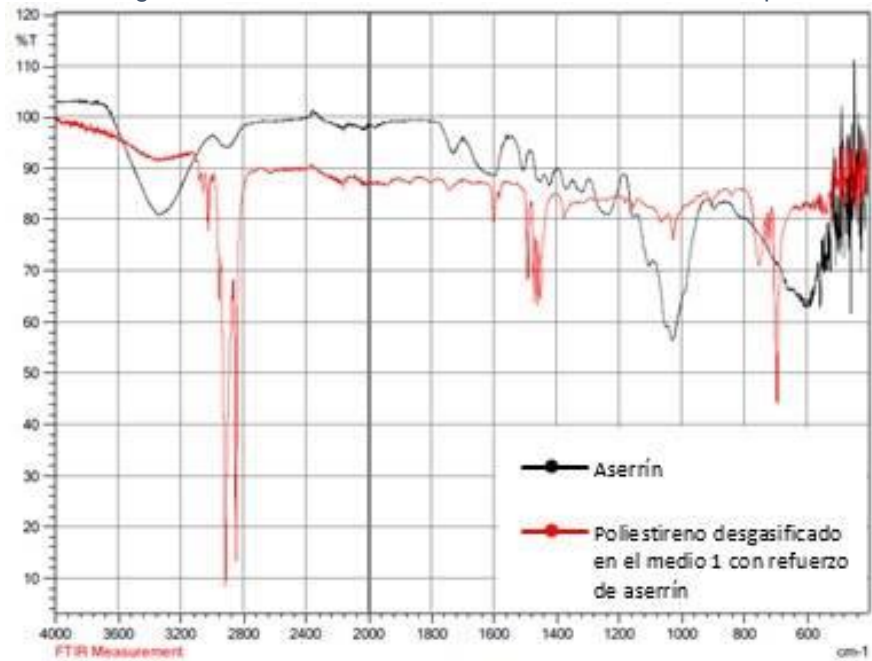
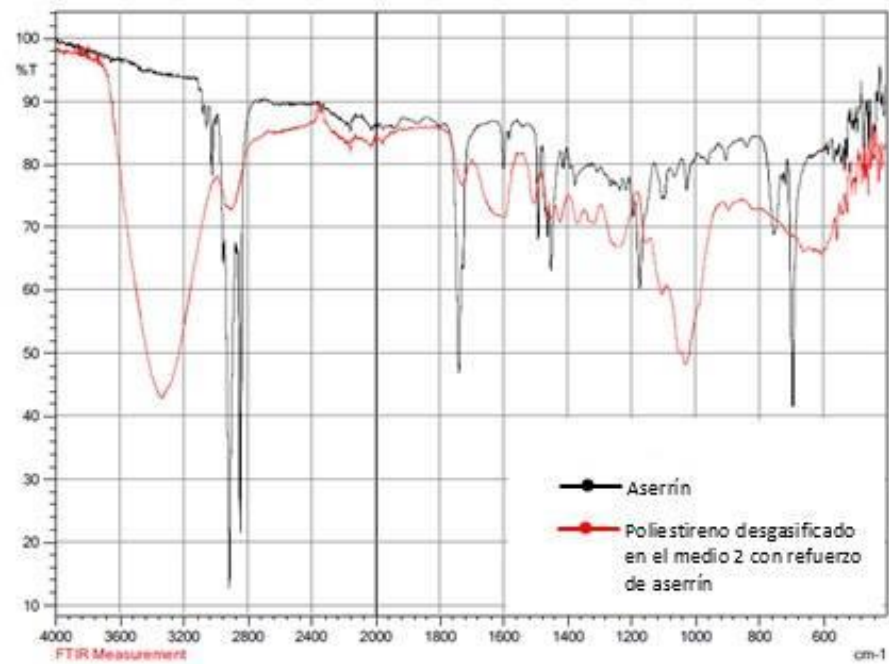


Figura 7. Poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín comparado con aserrín



4.2. RESULTADOS DSC

Los termogramas resultantes del análisis DSC en el PE, PE desgasificado y el material compuesto pueden ser analizados en las Figuras 11–15. De los termogramas –aunque la escala no permite el reconocimiento visual– se sigue que los medios hidrocarbonados alteran levemente la temperatura de transición vítrea del PE desgasificado (tabla 5); esto se debe a que las moléculas de los medios hidrocarbonados se ubican en medio de la estructura sólida del PE desgasificado, permitiendo que las cadenas se muevan más fácilmente a una menor temperatura [31]. Asimismo, los termogramas muestran que los medios hidrocarbonados aportan procesos de fusión al inicio, debido a su incorporación en el material compuesto. Por otra parte, como se esperaba por las propiedades de la madera, los termogramas sugieren que el refuerzo de aserrín no presenta influencia marcada sobre el comportamiento calorimétrico del material.

Figura 8. DSC poliestireno expandido

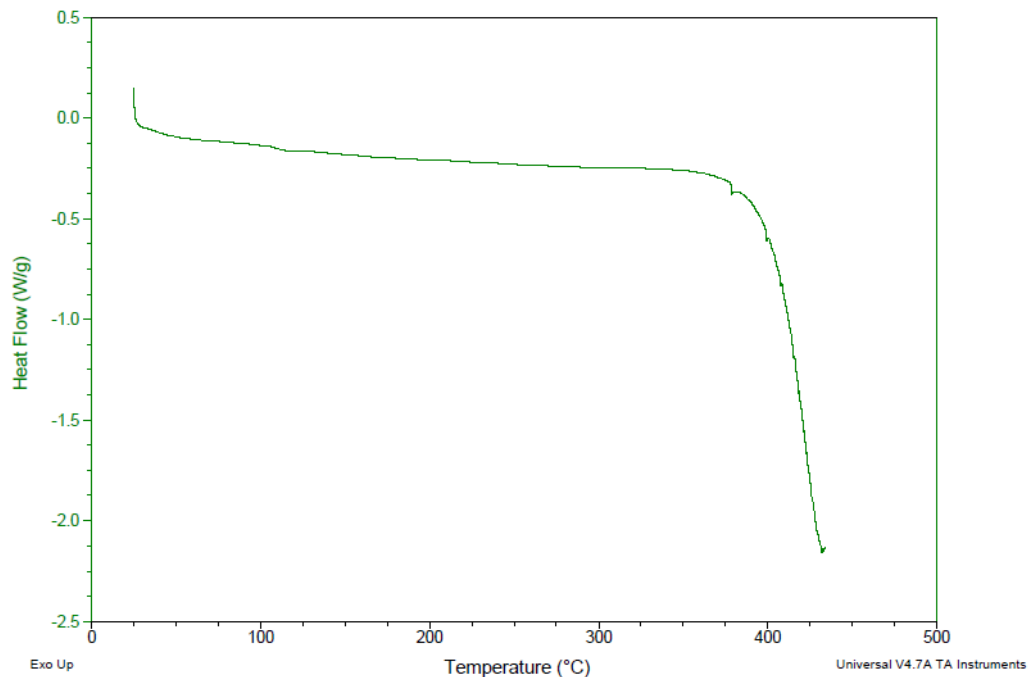


Figura 9. DCS poliestireno desgasificado en el medio 1

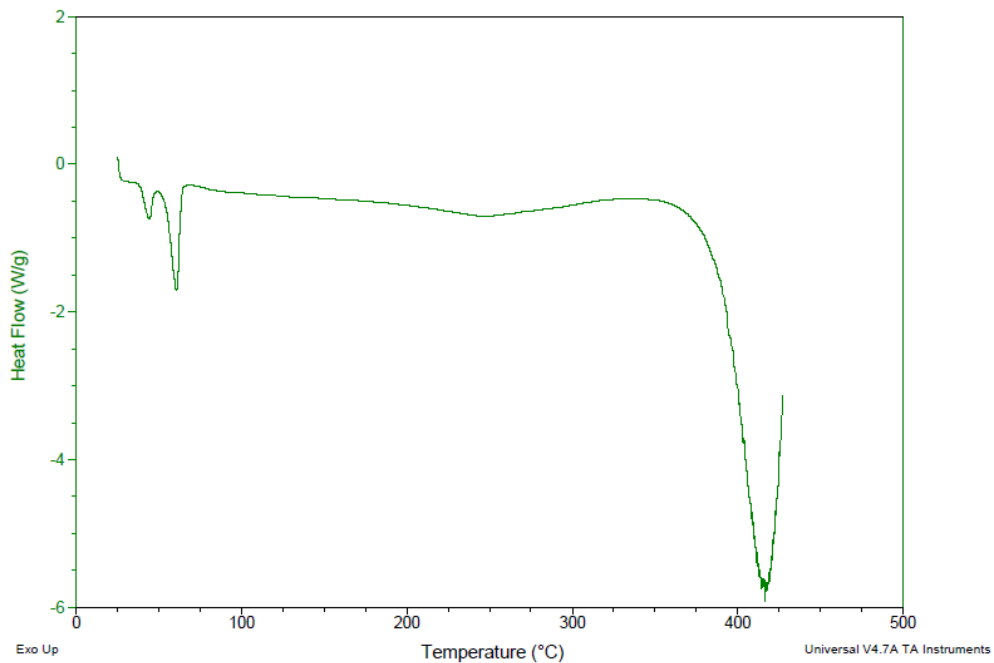


Figura 10. DSC poliestireno desgasificado en el medio 2

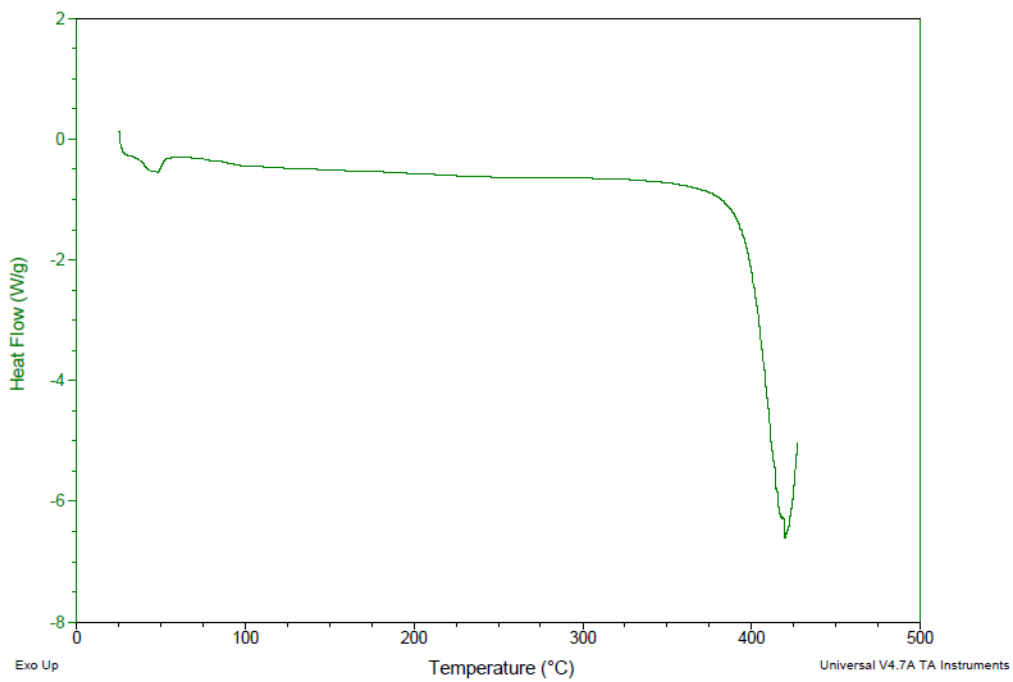


Figura 11. DSC poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín

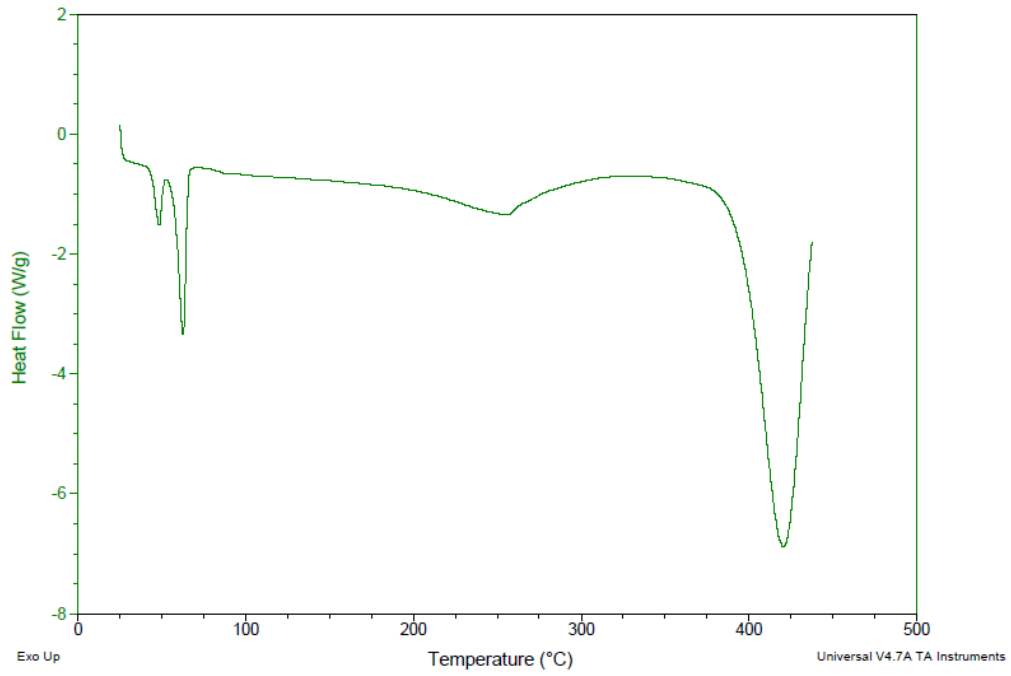


Figura 12. DSC poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín

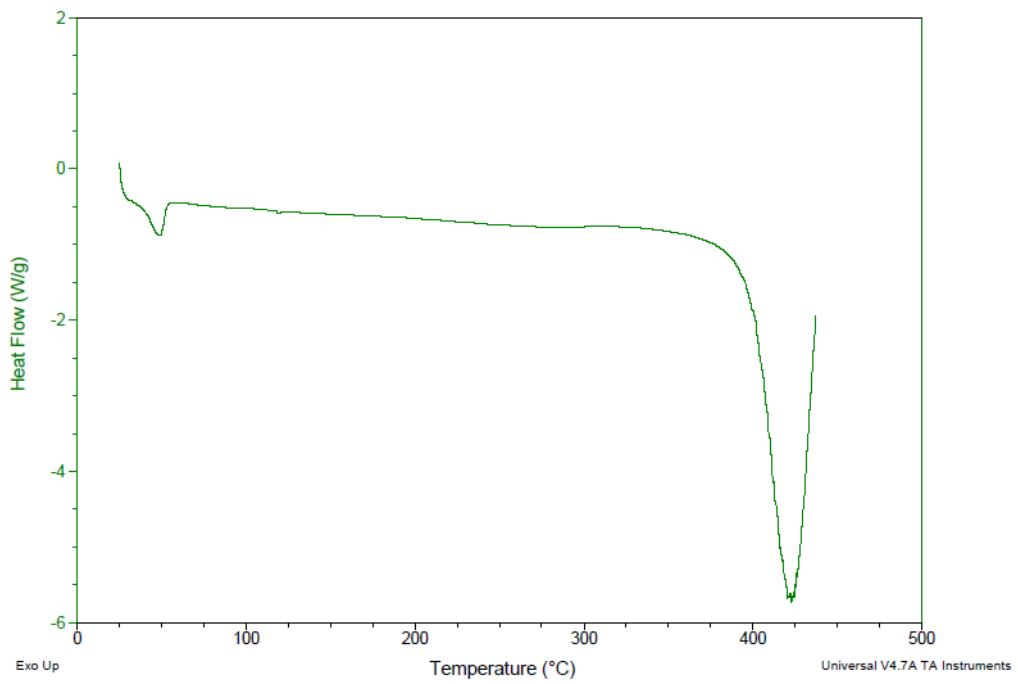


Tabla 5. Picos representativos y Temperatura de transición vítrea

Muestra	Tg [°C]	Tm [°C]
Poliestireno	110	-
Poliestireno desgasificado en medio 1	95	50 60 250 420
Poliestireno desgasificado en medio 2	100	50 420
Poliestireno desgasificado en mezcla	100	50 60 250 420
Poliestireno desgasificado en medio 1 con refuerzo de aserrín	95	50 60 250 420
Poliestireno desgasificado en medio 2 con refuerzo de aserrín	100	50 420
Poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de aserrín	100	50 60 250 420

4.2.1. Capacidad calorífica: Para el manejo de materiales poliméricos es importante tener un estimado de su capacidad calorífica (C_p) con el fin de evitar el uso excesivo de energía durante su procesamiento; por lo anterior, se decide hacer una evaluación del C_p de las muestra de poliestireno, poliestireno desgasificado en mezcla y poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de 30% aserrín. Para cada caso, se selecciona un rango de temperatura bajo el cual el flujo de calor hacia la muestra sea aproximadamente constante, y para dicho rango se estima una capacidad calorífica punto a punto siguiendo los lineamientos expuestos en la guía metodológica del equipo [32], teniendo como base las capacidades caloríficas del zafiro y la celda vacía del equipo, mediante el desarrollo de la ecuación 1.

Ecuación 1. Capacidad calorífica de la muestra

$$C_p = \left(\frac{y}{y'}\right) * \left(\frac{m'}{m}\right) * C_p'$$

y : Diferencia entre el flujo de calor registrado de la muestra y la cápsula vacía a la misma temperatura [J/s]

y' : Diferencia entre el flujo de calor registrado del zafiro y la cápsula vacía a la misma temperatura [J/s]
 m' : Masa del zafiro [g]
 m : Masa de la muestra [g]
 Cp' : Capacidad calorífica del zafiro [J/KgK]

Los resultados obtenidos se ajustan a una curva de tendencia que permita estimar un promedio, como se muestra en las figuras 16 y 17 y en el Anexo I. En la tabla 6 se presentan las capacidades caloríficas estimadas para cada muestra.

Tabla 6. Capacidades caloríficas estimadas

Muestra	Masa [g]	Temperatura [°C]	Cp [J/KgK]
Poliestireno expandido	0.001	115 - 215	6216.0
Poliestireno desgasificado en mezcla	0.009	105 - 355	2890.7
Poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de 30% aserrín	0.008	105 - 245	3141.5

La capacidad calorífica encontrada para el material original, es superior a la reportada en la literatura ca. 1500 J/KgK [33], lo cual puede deberse a diferencias en las densidades de las muestras utilizadas. Como fue mencionado anteriormente, el 98% de este material está ocupado por aire, confiriéndole al poliestireno expandido una baja densidad, es por esta razón que la masa usada para el desarrollo de esta prueba es inferior a la que se toma para las otras muestras.

De otro lado, de las figuras 16 y 17 se sigue que la adición de aserrín genera un aumento en la capacidad calorífica del material compuesto con respecto al poliestireno desgasificado.

Figura 13. Capacidad calorífica del poliestireno desgasificado en mezcla

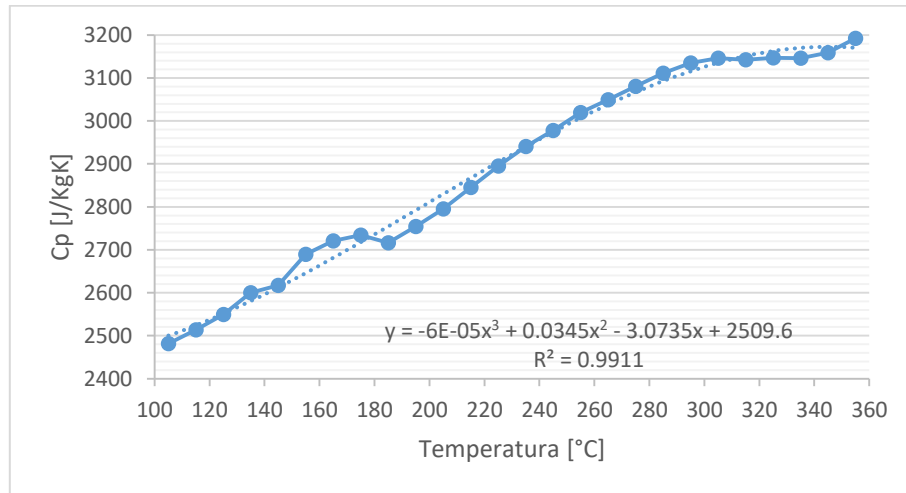
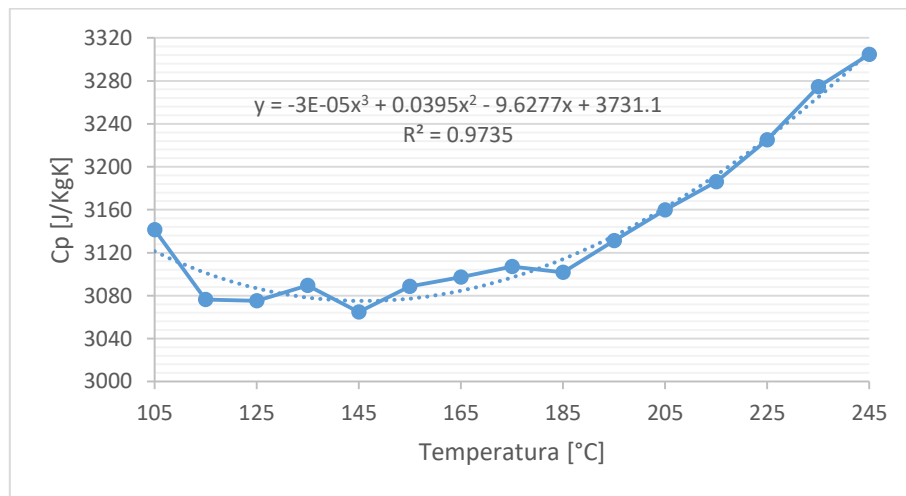


Figura 14. Capacidad calorífica del poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de 30% aserrín



4.3. RESULTADOS PRUEBAS MECÁNICAS

4.3.1. Ensayo de Tensión: Los resultados de la resistencia del material a la tensión, cuando se aplica una fuerza promedio de 1000 N hasta su rotura, para los diferentes materiales elaborados pueden ser consultados en la Tabla 7.

Para la estimación del esfuerzo se toma el área transversal a la aplicación de la fuerza, que corresponde al área comprendida por 2mm de grosor y 8 mm de

ancho en el cuello del corbatín (Ver Anexo E, figura 32). Se reporta el valor más alto de las tres mediciones realizadas y se clasifican según el medio de calentamiento con el fin de analizar la influencia del método de preparación y el porcentaje de material de refuerzo en las propiedades descritas por el material.

Tabla 7. Resultados de resistencia a la tensión del material

Método de preparación	Medio de calentamiento	Refuerzo [%]	Esfuerzo 1 [MPa]	Esfuerzo 2 [MPa]	Esfuerzo 3 [MPa]
-	1	-	18.75	12.5	18.75
-	2	-	6.25	<6.25	6.25
-	Mezcla	-	25	25	25
Refuerzo durante el proceso de desgasificación	1	15	12.5	12.5	12.5
	2	15	12.5	6.25	6.25
	Mezcla	15	18.75	25	18.75
	1	30	12.5	6.25	6.25
	2	30	<6.25	<6.25	<6.25
	Mezcla	30	18.75	18.75	12.5
Refuerzo durante el proceso de molienda	1	15	18.75	18.75	18.75
	2	15	12.5	12.5	18.75
	Mezcla	15	12.5	18.75	12.5
	1	30	6.25	12.5	12.5
	2	30	6.25	6.25	6.25
	Mezcla	30	12.5	18.75	12.5

Durante los ensayos, las muestras de poliestireno en medio hidrocarbonado 2 y, poliestireno en medio hidrocarbonado 2 y mezcla con refuerzo de 30% de aserrín durante el proceso de desgasificación, presentaron mediciones inferiores a 6,25 MPa, debido a la sensibilidad del equipo.

Según las figuras 18 y 19, la adición del aserrín como refuerzo de la matriz polimérica presenta diferentes propiedades mecánicas según el método de preparación del material compuesto. De estas figuras se sigue que la preparación por el proceso de molienda produce un material compuesto con mayor resistencia a la tensión. Asimismo, existe una mayor tenacidad en las muestras con 15% en peso de aserrín; después de este valor se

presenta una disminución en la resistencia del material, lo cual puede ser consecuencia de una insuficiente incorporación del aserrín en el medio hidrocarbonado.

Figura 15. Resistencia a la tensión de poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín

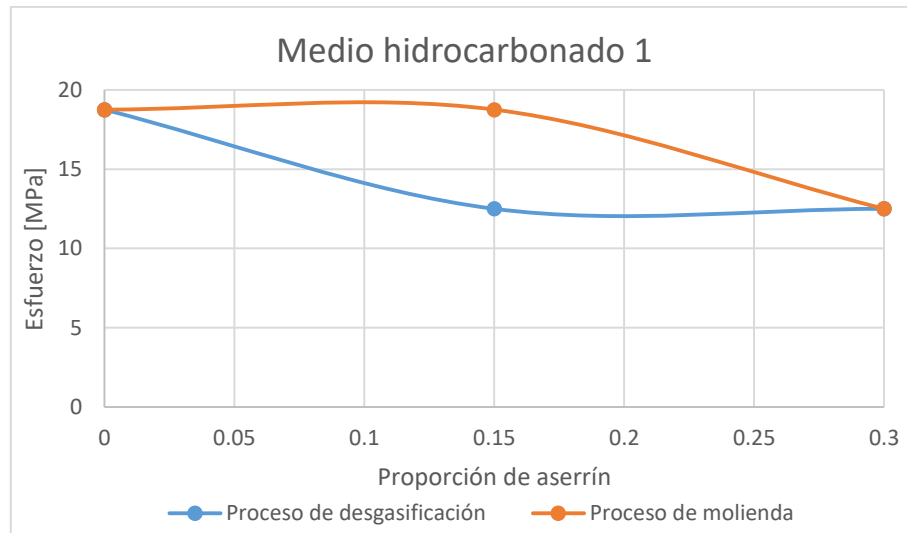
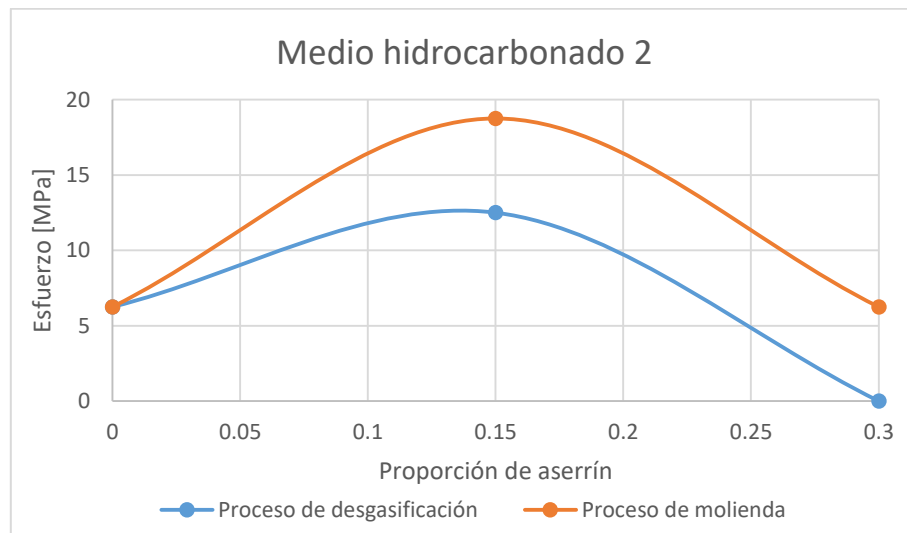


Figura 16. Resistencia a la tensión de poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín



Por otra parte, cuando se dispone de mezcla como medio de calentamiento (Anexo J) el comportamiento cambia completamente, ya que las mejores propiedades se obtienen usando el método de refuerzo en el proceso de desgasificación; sin embargo, al igual que para los medios 1 y 2 se obtiene que las propiedades desmejoran con porcentajes de refuerzo de aserrín mayores de 15%. Según las tendencias obtenidas, las muestras de

PE desgasificado en mezcla y con refuerzo 15% de aserrín en mezcla, constituyen la mejor opción en resistencia a la tensión de todas las posibilidades planteadas.

Adicionalmente, la Tabla 8 presenta una recopilación de diferentes materiales y sus respectivos valores de tensión última o esfuerzo de tracción reportados en la literatura. Estos materiales presentan características similares al del material tratado en el presente documento. La resistencia a la tensión registrada por el material compuesto sintetizado es significativamente menor a la resistencia de los plásticos descritos en la tabla 8, siendo superior únicamente al polietileno de baja densidad (LDPE); lo cual permite concluir que en términos de resistencia a la tensión la aplicabilidad del material es restringida, considerando además que por sus características físicas de rigidez no se presta para moldeo de bolsas o envoltorios.

Tabla 8. Propiedades y aplicaciones de materiales termoplásticos

Material	Esfuerzo [MPa]	Aplicaciones
LDPE	10	Aislante eléctrico, bolsas, envoltorios.
Poliestireno de alto impacto	25	Juguetes, equipos electrónicos, envases, utensilios de cocina.
ABS	28	Partes automotrices, juguetes, electrónicas, instrumentos musicales.
HDPE	28	Recipientes y tapas, envases de alimentos, juguetes, tuberías y conductos.
Polipropileno	38	Baldes, recipientes, muebles, sillas, juguetes, películas para envases de alimentos, fibras.
PVC	52	Envases, tuberías, cables, juguetes, techos tensados.
Polycarbonato	66	Cubiertas de invernadero, garrafones de agua mineral, juguetes, proyectores, visores, casetes.
Acrílico	67	Farolas de autos, reflectores, acuarios, ventanas, barreras de pistas de hielo, fibras ópticas.

Fuente: CURBELL PLASTICS [34]

4.3.2. Ensayo de Impacto: Para las pruebas de impacto se dispuso del equipo *Pendulum Impact Tester* a un ángulo inicial de 80° y altura de 0.2845 m, con un peso de 2.5 Kg.

Para la estimación de la resistencia del material al impacto se toma el espesor de la muestra según la norma ASTM D6110 (ver Anexo E, figura 33),

reportando los resultados en unidades de J/m. Al igual que para los ensayos de tensión, se reporta el mejor valor de las tres mediciones realizadas y se clasifican según el medio de calentamiento.

Tabla 9. Resultados de resistencia al impacto del material

Método de preparación	Medio de calentamiento	Refuerzo [%]	Resistencia 1 [J/m]	Resistencia 2 [J/m]	Resistencia 3 [J/m]
-	1	-	756.894	739.563	765.131
-	2	-	636.471	624.729	624.729
-	Mezcla	-	756.894	756.894	748.371
Refuerzo durante el proceso de desgasificación	1	15	756.894	748.371	765.131
	2	15	647.962	647.962	588.039
	Mezcla	15	765.131	756.894	756.894
	1	30	701.542	670.179	680.898
	2	30	670.179	670.179	670.179
	Mezcla	30	739.563	739.563	730.473
Refuerzo durante el proceso de molienda	1	15	730.473	711.460	711.460
	2	15	765.131	748.371	765.131
	Mezcla	15	721.105	739.563	711.460
	1	30	624.729	636.471	636.471
	2	30	691.354	691.354	691.354
	Mezcla	30	670.179	670.179	670.179

En la Figura 20 se aprecia que el proceso de refuerzo con aserrín durante la desgasificación de la matriz polimérica presenta mejor resistencia al impacto para proporciones inferiores al 15%; para valores superiores a éste, dicha propiedad exhibe una disminución lineal en su valor. Igualmente se obtiene un patrón de comportamiento similar para el proceso de molienda aunque los valores obtenidos muestran una menor resistencia al impacto comparados con el proceso de desgasificación en el mismo medio, especialmente para valores superiores al 15%.

Por otra parte, al disponer del segundo medio hidrocarbonado (Figura 21), se observa el comportamiento contrario al descrito en la figura 20, debido a que prevalece el rendimiento del procedimiento de molienda sobre el de desgasificación. Además de lo anterior, cabe resaltar la tendencia cóncava que sigue la curva, la cual describe mejores resultados para las muestras realizadas al 15% de refuerzo en molienda, mientras que a

porcentajes superiores la presencia de medio hidrocarbonado le confiere fragilidad al material compuesto.

Figura 17. Resistencia al impacto de poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín

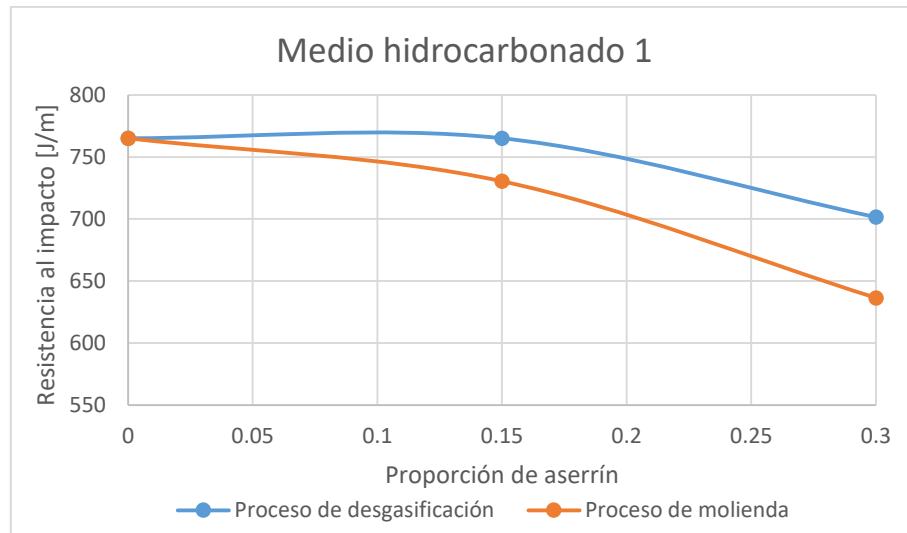
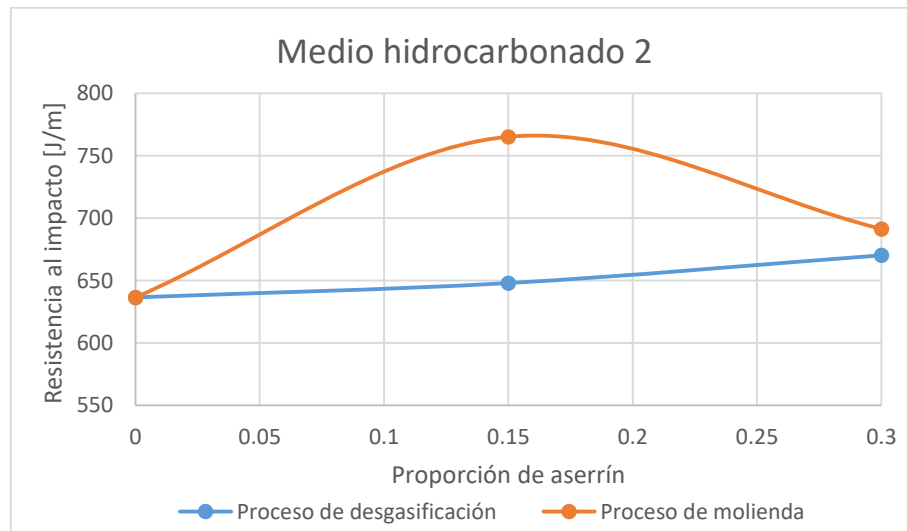


Figura 18. Resistencia al impacto de poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín



En el anexo K se puede observar que cuando se tiene la mezcla de medios hidrocarbonados, el comportamiento es muy similar al descrito por el medio 1, ya que se obtienen mejores resultados cuando se refuerza la matriz polimérica durante la

desgasificación; sin embargo los valores de la tenacidad registrados por el material son ligeramente superiores.

Resumiendo, los mayores valores para el ensayo de impacto se presentan en las muestras de poliestireno desgasificado en medio 1, poliestireno desgasificado en medio 1 y mezcla con refuerzo de 15% de aserrín durante desgasificación, y poliestireno desgasificado en medio 2 con refuerzo de 15% durante molienda.

La evaluación de la tenacidad al impacto del material se realizó mediante el método de Charpy, de la norma ASTM D6110 y según la disponibilidad de equipos del laboratorio; sin embargo, en la literatura se encuentran datos a partir de ensayos tipo Izod [16,34]. Por lo anterior, no se establece comparación directa entre los resultados obtenidos y la tenacidad de otros termoplásticos; no obstante en la tabla 10 se muestra los reportes para otros plásticos con el fin de ofrecer una referencia de su resistencia. Tomando dichos valores como referencia, la resistencia del material compuesto sintetizado aparece mayor que la mayoría de los polímeros expuestos en la tabla 10, a excepción del policarbonato. La realización de ensayos tipo Izod para el material compuesto es recomendado en un trabajo futuro para establecer comparaciones adecuadas.

Tabla 10. Resistencia al impacto de materiales poliméricos

Material	Tenacidad al impacto [J/m]
Acrílico	21.351
PVC	53.379
Polipropileno	64.054
Poliestireno de alto impacto	149.460
ABS	411.016
Policarbonato	854.059

Fuente: CURBELL PLASTICS [34]

- 4.3.3. Ensayo de compresión: Para este ensayo se realizan las probetas siguiendo las normas D695 para pruebas de compresión. Para la estimación de la resistencia del material se toma el área transversal a la aplicación de la fuerza, que corresponde al área de un círculo de ½ pulgada de diámetro (ver Anexo E, figura 33).

En las figuras 22 y 23 y en el anexo L se observa que el refuerzo de la matriz polimérica independiente del porcentaje de aserrín y del medio de calentamiento, desmejora drásticamente la resistencia de material a la compresión.

Adicionalmente, durante la realización de los ensayos se evidenció que las muestras con refuerzo de aserrín se desmoronaban fácilmente, la poca cantidad de medio hidrocarbonado incorporado no permite la adhesión adecuada de la matriz polimérica con el refuerzo, causando la presencia de microgrietas que propagan con facilidad el esfuerzo sobre el material. Por otra parte la adición de aserrín reduce la movilidad de las cadenas poliméricas, disminuyendo la capacidad del material para absorber la energía durante la propagación del esfuerzo hasta la fractura (ver [16]). Por lo anterior, el mejor comportamiento lo exhiben las muestras sin refuerzo de aserrín, y el máximo valor se obtiene con poliestireno desgasificado en el medio 1. Asimismo, el porcentaje de compresión de las muestras (anexo M) es inferior al 2%.

Tabla 11. Resultado de la resistencia a la compresión del material

Método de preparación	Medio de calentamiento	Refuerzo [%]	Resistencia 1 [MPa]	Resistencia 2 [MPa]	Resistencia 3 [MPa]
	1	-	52.890	54.469	50.522
	2	-	36.313	37.892	37.892
	Mezcla	-	44.996	42.628	46.575
Refuerzo durante proceso de desgasificación	1	15	10.262	10.262	11.841
	2	15	7.105	8.684	7.894
	Mezcla	15	17.367	20.525	15.788
	1	30	12.631	10.262	8.684
	2	30	9.473	7.105	8.684
	Mezcla	30	11.052	10.262	8.684
Refuerzo durante proceso de molienda	1	15	7.105	5.526	6.315
	2	15	11.841	11.052	11.052
	Mezcla	15	11.841	14.209	8.684
	1	30	4.736	6.315	3.947
	2	30	11.052	7.894	8.684
	Mezcla	30	11.052	7.894	9.473

Figura 19. Resistencia a la compresión de poliestireno desgasificado en el medio 1 con refuerzo de aserrín

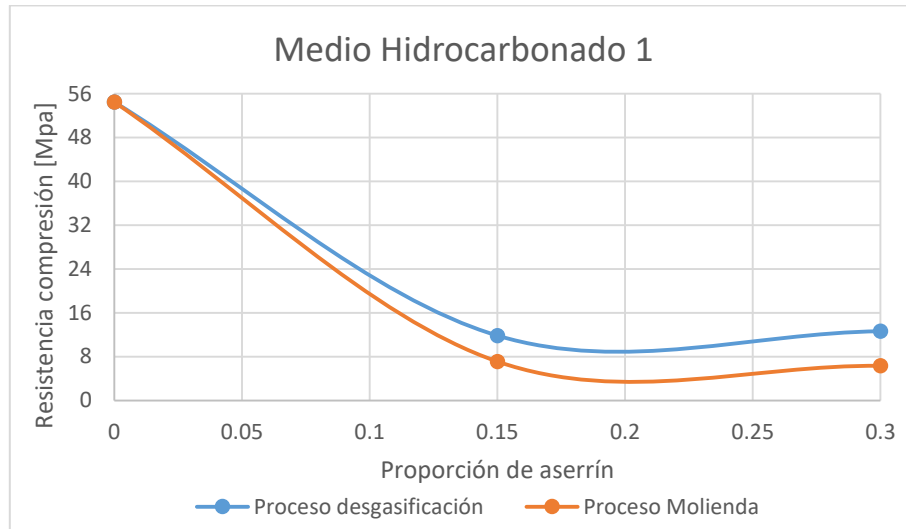
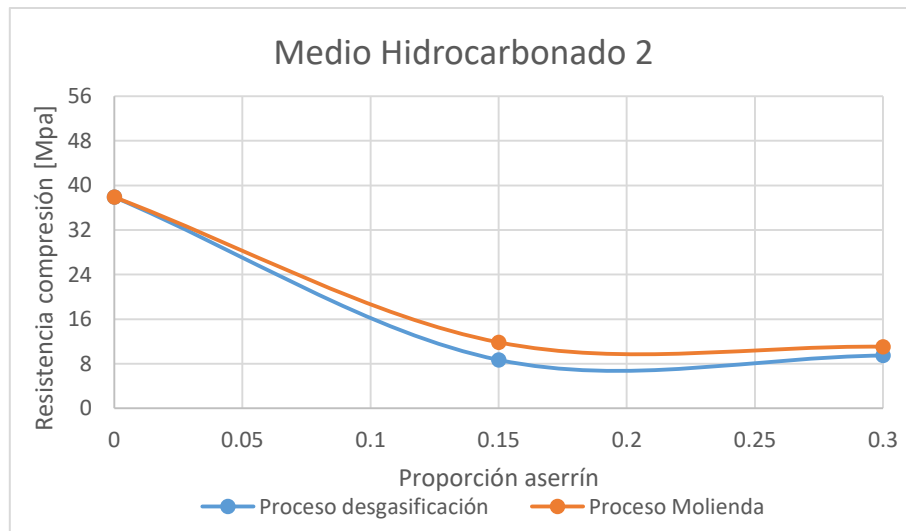


Figura 20. Resistencia a la compresión de poliestireno desgasificado en el medio 2 con refuerzo de aserrín



Para establecer una referencia de la aplicabilidad del material se establecen comparaciones con los termoplásticos mostrados en la tabla 12; según los valores de esta tabla, el material compuesto sintetizado de mayor resistencia (poliestireno desgasificado en medio 1) presenta un valor inferior a la mayoría de los plásticos descritos, a excepción del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Tabla 12. Resistencia a la compresión de materiales termoplásticos

Material	Resistencia a la compresión [MPa]
ABS	20
PVC	65.50
Policarbonato	86.18
Acrílico	117.21

Fuente: PLASTICS INTERNATIONAL [35]

Los valores para las propiedades mecánicas del material compuesto sintetizado en el presente trabajo sugieren que el material presenta poca resistencia a la tensión; sin embargo, exhibe resistencia a la compresión y al impacto. Una potencial aplicación de este material puede residir en la elaboración de adoquines para andenes. El ensayo de compresión figura dentro de las propiedades físico mecánicas para caracterizar adoquines en Colombia. La norma Técnica Colombiana NTC 2017 [37] reporta un intervalo de resistencia entre 15.83 y 43.98 MPa [36] para probetas de cemento. Con lo anterior, las muestras de poliestireno desgasificado en medios 1, 2 y mezcla, podrían ser dispuestas para este uso. Sin embargo, la norma técnica tiene como criterio para control de calidad el ensayo de flexotracción, motivo por el cual se recomienda realizar dicho ensayo para las muestras ajustadas a las dimensiones requeridas para verificar la aplicación del material compuesto sintetizado.

5. CONCLUSIONES

- La desgasificación de poliestireno expandido en los medios hidrocarbonados utilizados corresponde a una forma de reciclaje viable y económica para este polímero. Los medios hidrocarbonados utilizados son incorporados en el PE desgasificado, en mayor proporción el medio 2. El uso de estos medios no requiere métodos adicionales de extracción de exceso de disolvente.
- Adicionalmente a partir de la evaluación de las propiedades estructurales del material sintetizado mediante los análisis de FTIR se puede concluir que los procesos de desgasificación y refuerzo con aserrín son una mezcla, sin presencia de reacciones, lo cual conserva las características del polímero. Asimismo, el material compuesto presenta un aumento en su capacidad calorífica con el porcentaje de aserrín. Por lo anterior, el tratamiento térmico del material compuesto reforzado requiere mayor energía comparado con la necesaria para el PE desgasificado.
- La evaluación de las propiedades mecánicas del material sintetizado sugiere que la adición de aserrín es conveniente hasta un porcentaje aproximado del 15%, ya que a medida que su proporción aumenta, las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión e impacto disminuyen. De otro lado, para la resistencia a la compresión se hace evidente que no es conveniente adicionar aserrín; el mayor valor de compresión se obtiene para el PE desgasificado en el medio 1 seguido de la desgasificación en mezcla.

6. RECOMENDACIONES

- La continuación de la evaluación del material compuesto sintetizado es recomendable para verificar su potencial aplicación como material de construcción.
- El uso de nuevos materiales de refuerzo, adicionales al aserrín, es recomendable para determinar aplicaciones de la matriz de poliestireno desgasificado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BORDAS ALSINA, Santiago y ELIAS CASTELLS, Xavier. Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad. [En línea]. Madrid. Ediciones Díaz de Santos, 2012. p. 25. (Recuperado en 15 de agosto de 2016). Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=_GL_W-seakgC&redir_esc=y
2. KAYA, Ayse y KAR, Filiz. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. [Base de datos en línea]. Construction and Building Materials. 2016, nro. 105. p. 572-578. (Recuperado 15 de agosto de 2016). Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2052/science/article/pii/S0950061815308485>.
3. NOTARI, Marcelo, et al. Process for the recycling of expanded polystyrene. Patent US7728047 B2. Fecha de publicación 1 junio de 2010. Washington, DC
4. QUINTERO PEÑA, Carlos. Reciclaje termo-mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios. [En línea]. Trabajo de investigación. Universidad de Manizales. Manizales. 2013. (Recuperado en 15 de agosto de 2016). Disponible en: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/jspui/bitstream/6789/762/1/TESIS%20CARLOS%20QUINTERO.pdf>
5. ZION RESEARCH. Polystyrene (PS) and Expandable Polystyrene (EPS) Market for building & construction, electrical & electronics, packaging and other applications: Global industry perspective, comprehensive analysis, and forecast, 2014 – 2020. [En línea]. Estados Unidos. Market Research Store, 2015. (Recuperado en 17 de agosto de 2016). Disponible en: <http://www.marketresearchstore.com/report/polystyrene-expandable-polystyrene-market-for-building-z37708>.
6. ARCHILA PRADA, Nathaly y RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Lady Carolina. Estudio de la preparación de formulaciones estireno-caucho y caucho metacrilato de metilo, utilizando poliestireno postconsumo. [Base de datos en línea]. Trabajo de investigación pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2015. (Recuperado 17 de agosto de 2016) de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/156387.pdf>

7. TÉLLEZ MALDONADO, Alejandra. La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. [Base de datos en línea]. Trabajo de investigación posgrado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2012. (Recuperado 19 de octubre de 2016) de <http://www.bdigital.unal.edu.co/7080/1/905077.2012.pdf>
8. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.
9. EMPRESA DE ASEO DE BUCARAMANGA. S.A. E.S.P. EMAB
10. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA. CAR-CDMB.
11. COLOMBIA. COMPROMISO EMPRESARIAL PARA EL RECICLAJE. CEMPRE
12. CONSEJO EMPRESARIAL COLOMBIA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE, CECODES.
13. BÉLGICA. BUREAU OF INTERNATIONAL RECYCLING, BIR.
14. SAMPER, M; RICO, M; FERRANDIZ, S. y LÓPEZ, J. Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. I simposio iberoamericano de ingeniería de residuos. [En línea]. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy. España. 2008. (Recuperado 19 de octubre 2016). Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A26.pdf>
15. SHIN, Changyun y CHASE, George. Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent. [Base de datos en línea]. Polymer Bulletin. 2005. Nro. 55. p. 209 – 215. Recuperado 19 de octubre de 2016 de <http://ezproxy.uis.edu.co:2110/article/10.1007/s00289-005-0421-2>
16. POLETTO, Mathews, *et al.* Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. [Base de datos en línea]. Waste Management. 2011. Nro. 31. p. 779 – 784. Recuperado 21 de octubre de 2016 de <http://ezproxy.uis.edu.co:2052/science/article/pii/S0956053X10005817>
17. CARRILLO BAEZA, J.G, *et al.* Aprovechamiento de nuevos productos en base a poliestireno expandido recuperado Revista colombiana de materiales. [En línea]. 2014. Nro. 5. p. 15 - 20. (Recuperado 31 de octubre de 2016). Disponible en:

<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/19081/16475>

18. PECCE, Marisa; CERONI, Francesca; BIBBO, Fabio Antonio y ACIERNO, Stefano. Steel-concrete bond behaviour of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS). [Base de datos en línea]. *Materials and Structures*. 2015. Nro. 48. p.139–152. Recuperado 3 de noviembre de 2016 de <http://ezproxy.uis.edu.co:2110/article/10.1617/s11527-013-0173-7>
19. SARMIENTO, Adriana, *et al.* Expanded Polystyrene (EPS) and waste cooking oil (wco): from urban wastes to potential material of construction. *Waste and biomass valorization*. [Base de datos en línea]. 2016. Nro. 7. p. 1245 – 1254. Recuperado 3 de septiembre de 2016 de <http://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9511-7>
20. CASTANERO RIOS, Rubén Darío. Aprovechamiento de los residuos de la madera y su posible reutilización en fabricación de biomasa generada en Bogotá. [Base de datos en línea]. Trabajo de investigación pregrado. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. 2014. (Recuperado 10 de enero de 2017) de <http://www.udistrital.edu.co:8080/documents/138588/2869739/PROYECTO+FINAL.pdf>
21. BRYDSON, J.A. *Plastics Materials. The Chemical Nature of Plastics*, en: *Plastics Materials*. [En línea]. Séptima edición. 2007. p. 19 – 42. Disponible en <http://ezproxy.uis.edu.co:2052/science/article/pii/B9780750641326500437>
22. ÁLVAREZ, R. A; CRUZ, R. L. y MENDOZA, G. *Ciencia de los Materiales. Poliestireno expandido (EPS)*.
23. ACEVEDO, Rosa y RAMÍREZ, Angélica. Estudio para la elaboración de emulsiones a partir de poliestireno expandido post-consumo. [Base de datos en línea]. Trabajo de investigación pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2013. (Recuperado 19 de agosto de 2016) de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/148337.pdf>
24. GARCÍA, María Teresa, *et al.* Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. [Base de datos en línea]. 2009. Nro. 11. p. 2 – 5. (Recuperado 3 de septiembre de 2016) de <http://link.springer.com/article/10.1007/s10163-008-0210-8>

25. QUIROZ, Francisco, *et al.* Reciclaje de Poliestireno Expandido por el Método de Disolución Precipitación. [En línea]. Revista Politécnica. Nro. 2. p. 1–9. 2015. (Recuperado 5 de septiembre de 2016) Disponible en <http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen36/tomo2/ReciclajedePoliestirenoExpandido.pdf>

26. NOTARI, Marcelo y RIVETTI, Franco. Use of dialkyl carbonates as solvents for expanded polystyrene. Patent US 7745503 B2. Fecha de publicación 29 junio de 2010. Washington, DC

27. FAO. Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales, en: Aprovechamiento potencial de los residuos de madera para la producción de energía. [En línea]. 1991. p. 79–100. Disponible en https://books.google.com.co/books?id=dW1jtvvVB0UC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

28. CEPSA. Compañía Española de Petróleos, S.A.U. [En línea]. Disponible en: http://www.cepsa.com/cepsa/Que_ofrecemos/Bases_y_Parafinas

29. OCKERMAN, H. y HANEN, C. Industrialización de subproductos de origen animal. Editorial Acribia. Zaragoza. 1995. p. 123-234.

30. MILLIGAN, Graeme y KIMURA, Ikuo. Free fatty acids receptors, Handbook of experimental pharmacology. 2004.

31. THE GLASS TRANSITION. Polymer science learning center. Department of Polymer Science, University of Southern Mississippi. [En línea]. Recuperado 29 de marzo de 2017. Disponible en: <http://pslc.ws/macrog/tg.htm>

32. OSPINA, Javier y RONDÓN, Andrea. Guía metodológica para realizar el análisis mediante el calorímetro de barrido diferencial (DSC Q10), como servicio extensión a la industria nacional por parte de la escuela de ingeniería química, UIS. [Base de datos en línea]. Trabajo de investigación pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2006. (Recuperado 15 de marzo de 2017) de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6178/2/119469.pdf>

33. YUCEL, K. T; BASYIGIT, C y OZEL, C. Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials. In 15th Symposium in Thermophysical Properties. [En línea]. 2003. p. 54 - 66. Disponible en:

<http://zenonpanel.com.mk/al/wp-content/uploads/2009/06/Thermal-Insulation-properties.PDF>

34. ESTADOS UNIDOS. CURBELLPLASTICS. Plastic properties table.
35. PLASTICS INTERNATIONAL. Plastics rods, sheets, plate, tube & film. Material Properties. [En línea]. Eden Prairie, Minnesota. (Recuperado 10 de abril de 2017). Disponible en: http://www.plasticsintl.com/sortable_materials.php
36. ARANGO LONDOÑO, Juan F. Adoquines de concreto: propiedades físico mecánicas v sus correlaciones. . [Base de datos en línea]. Revista tecnológicas. 2006. No. 16. p. 121-137. (Recuperado 13 de abril de 2017). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234272007>
37. DI MARCO MORALES, Raúl. Diseño y elaboración de un sistema de adoquines de bajo costo y material reciclado para construcciones en núcleos rurales. [Base de datos en línea]. Revista ESAICA. 2015. Vol.1 No. 1. p. 30-38. (Recuperado 13 de abril de 2017). Disponible en: <http://revistas.udes.edu.co/site/index.php/esaica/article/view/269>
38. ANDREAH. Técnicas analíticas y equipos. Facultad de Física. [En línea] Universidad Autónoma de México. Disponible en: http://www.fisica.unam.mx/andreahtecnicas_equipos/ftir.html
39. Unidad de Espectroscopía Molecular. Laboratorio de Espectroscopía de infrarrojos por Transformada de Fourier. [En línea]. Servicio Interdepartamental de Investigación, Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: [https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668321638/1242666544712/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Espectroscopia_de_Infrarrojos_por_Transformada_de_Fourier_\(FTIR\).htm](https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668321638/1242666544712/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Espectroscopia_de_Infrarrojos_por_Transformada_de_Fourier_(FTIR).htm)
40. SURIÑACH, S, *et al.* La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la ciencia de los materiales. [En línea]. Física de materiales. Departamento de Física, Universidad Autónoma de Barcelona. 1992. p. 11-17. Disponible en: <http://boletines.secv.es/upload/199231011.pdf>

41. MARTÍN, José María. Introducción a la ciencia de materiales: técnicas de preparación y caracterización. Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Edición 20. Madrid.1993.
42. JORBA, Jordi; NUÑEZ, Carlos y ROCA, Antoni. Comportamiento mecánico de los materiales: Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos. Universidad de Barcelona. Departamento de ingeniería química y metalúrgica. Edición 1. España. 2004.
43. TSAI, Stephen y MIRAVETE, Antonio. Diseño y análisis de materiales compuestos. Reverté.1988
44. Máquina de impacto. Curso de materiales. [En línea]. Facultad de Ingeniería Industrial, Laboratorio de producción. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Edición 2008-1. p. 3–27. Disponible en: <http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocols/MATE/PROTOCOLO%20IMPACTO.pdf>
45. REVISTA MEXICANA DE FÍSICA. Prueba de impacto: ensayo Charpy. Departamento de Física de materiales. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid. 2006. [En línea]. Disponible en http://rmf.smf.mx/pdf/rmf-e/52/1/52_1_51.pdf
46. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. 2004. [En línea]. Disponible en http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf
47. CASTELLANOS, Yudy y NAVARRO, Silvia. Elaboración y caracterización físico-mecánica de pre-pregs, utilizando poliestireno expandido post-consumo reforzado con fibras de fique. [Base de datos en línea]. Trabajo de investigación pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2013. (Recuperado 17 de agosto de 2016) de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/149759.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

CARRILLO BAEZA, J.G, *et al.* Aprovechamiento de nuevos productos en base a poliestireno expandido recuperado Revista colombiana de materiales. [En línea]. 2014. Nro. 5. p. 15 - 20. (Recuperado 31 de octubre de 2016). Disponible en: <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/19081/16475>

GARCÍA, María Teresa, *et al.* Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. Journal of Material Cycles and Waste Management. [Base de datos en línea]. 2009. Nro. 11. p. 2 – 5. (Recuperado 3 de septiembre de 2016) de <http://link.springer.com/article/10.1007/s10163-008-0210-8>

PECCE, Marisa; CERONI, Francesca; BIBBO, Fabio Antonio y ACIERNO, Stefano. Steel-concrete bond behaviour of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS). [Base de datos en línea]. Materials and Structures. 2015. Nro. 48. p.139–152. Recuperado 3 de noviembre de 2016 de <http://ezproxy.uis.edu.co:2110/article/10.1617/s11527-013-0173-7>

POLETTO, Mathews, *et al.* Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. [Base de datos en línea]. Waste Management. 2011. Nro. 31. p. 779 – 784. Recuperado 21 de octubre de 2016 de <http://ezproxy.uis.edu.co:2052/science/article/pii/S0956053X10005817>

SAMPER, M; RICO, M; FERRANDIZ, S. y LÓPEZ, J. Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. I simposio iberoamericano de ingeniería de residuos. [En línea]. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy. España. 2008. (Recuperado 19 de octubre 2016). Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A26.pdf>

SARMIENTO, Adriana, *et al.* Expanded Polystyrene (EPS) and waste cooking oil (wco): from urban wastes to potential material of construction. Waste and biomass valorization. [Base de datos en línea]. 2016. Nro. 7. p. 1245 – 1254. Recuperado 3 de septiembre de 2016 de <http://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9511-7>

SHIN, Changyun y CHASE, George. Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent. [Base de datos en línea]. Polymer Bulletin. 2005. Nro. 55. p. 209 – 215. Recuperado 19 de octubre de 2016 de <http://ezproxy.uis.edu.co:2110/article/10.1007/s00289-005-0421-2>

ANEXOS

ANEXO A. Técnicas de caracterización

➤ Espectrometría Infrarroja por Transformadas de Fourier:

Esta técnica proporciona un espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de las sustancias inorgánicas y orgánicas, por lo cual es posible realizar una identificación de los materiales [38].

Dependiendo del rango de energía de la radiación que sea utilizada, la interacción con el material será de diferente naturaleza. Al absorber la radiación infrarroja las moléculas pueden cambiar su estado de energía vibracional y rotacional. En el caso de muestras gaseosas sólo es posible observar las transiciones entre estados rotacionales que requieren muy poca energía. En el caso de muestras sólidas y líquidas, sólo se tienen en cuenta los cambios entre estados de energía vibracional lo que hace posible la caracterización de los principales grupos funcionales de la estructura molecular del compuesto [39].

➤ Calorimetría Diferencial de Barrido:

La calorimetría diferencial de barrido, o DSC, es una técnica experimental dinámica que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es mantenida a temperatura constante, durante un tiempo determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante, en un determinado intervalo de temperaturas. La calorimetría diferencial de barrido se ha revelado como una técnica importante en el campo de la Ciencia de Materiales debido a su elevado grado de sensibilidad y a su rápida velocidad de análisis.

Por otra parte, es bien sabido que el conocimiento de la estabilidad térmica de un material, así como la completa caracterización de sus transiciones, es de primordial interés en los materiales con potenciales aplicaciones industriales [40].

ANEXO B. Ensayos mecánicos

➤ Ensayo de Tensión:

Es de los ensayos más importantes, ya que proporciona gran información de la conducta mecánica del material. El ensayo consiste en someter a un estado de tensión uniaxial de manera repetitiva, estirando y comprimiendo el material, hasta provocar su fractura en un periodo de tiempo relativamente corto. [41]

A través de este ensayo se puede caracterizar el material, en las siguientes propiedades tecnológicas:

- Resistencia mecánica: Propiedad que evalúa el límite de cedencia del material, utilizada para la selección, diseño y estructura del mismo.
- Rigidez: Propiedad del material, intrínsecamente relacionada con el módulo de Young o elasticidad.
- Ductilidad: Propiedad que evalúa el alargamiento porcentual que sufre el material, previo a la fractura.
- Módulo de resiliencia: Definido como la máxima energía elástica acumulada por el material hasta alcanzar su límite de cedencia. [42]

➤ Ensayo de Compresión:

Permite determinar las constantes elásticas y de resistencia a la compresión. El ensayo consiste fundamentalmente en disponer una carga ligeramente excéntrica la cual provocará una rotura prematura o pandeo, antes que la rotura intrínseca a la compresión ocurra.[43]

➤ Ensayo de Impacto:

Consiste en dejar caer un péndulo pesado desde un ángulo α , el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma de paralelepípedo, ubicada en unos soportes en la base de la máquina. La probeta posee una muesca (entalle) estándar para facilitar el inicio de la fisura. Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando cierta altura (ángulo β) que depende de la cantidad de energía absorbida por la probeta durante el impacto [44].

La energía absorbida por la probeta, para producir su fractura, se determina a través de la diferencia de energía potencial del péndulo antes y después del impacto, mediante la expresión [45]:

Ecuación 2. Cálculo de la energía absorbida por la probeta

$$E_a = MgL[\cos(\beta) - \cos(\alpha)]$$

Donde M es la masa acoplada al extremo del péndulo, L es la longitud del péndulo, g es la aceleración de la gravedad.

ANEXO C. Normatividad ambiental para el manejo de plásticos

En Colombia el sector Plásticos cuenta con regulaciones para los procesos de transformación y el manejo de residuos post-consumo contenidos en un documento de Guías Ambientales “Principales Procesos Básicos de Transformación en la industria plástica y Manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo” emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Este documento incluye las normas más importantes para el sector, como lo son La Política de Producción Más Limpia aprobada por el Consejo Nacional Ambiental cuyo objetivo esencial es prevenir y minimizar los impactos y riesgos para los seres humanos y para el medio ambiente, garantizando la protección ambiental, el crecimiento económico, el bienestar social y la competitividad empresarial; y La Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos [46].

Entre las leyes, decretos y resoluciones aplicables para la industria del plástico vigentes en el ámbito nacional se encuentran:

- Ley 2811/74: artículo 34, desarrollado para el buen manejo de residuos, basuras, desechos y desperdicios.
- Resolución 1045/03: Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS.
- Resolución 2309/86: Regulación en el manejo, uso, disposición y transporte de los residuos sólidos con características especiales.

ANEXO D. Métodos de preparación Etapa I

➤ Refuerzo aplicado durante el proceso de desgasificación

Inicialmente se procede al calentamiento del medio de disolución, llevándolo a la temperatura establecida (Ver Anexo F, imagen 2). Una vez se logra la temperatura deseada, se agregan las piezas del poliestireno expandido y el material de refuerzo, de forma simultánea, con agitación manual constante. Se busca que la mayor proporción de la mezcla sea del medio de calentamiento para evitar la fragmentación del material generado.

Se mantiene la temperatura y la agitación buscando que el material ya desgasificado se compacte (Ver Anexo F, imagen 4). El material compactado se extrae del medio de calentamiento y se hace un pre-moldeo, permitiendo que las muestras se enfríen y aumenten su rigidez.

Se realiza una reducción de tamaño de las muestras pre-moldeadas, inicialmente en una prensa hidráulica para quebrarlas y a continuación en un molino de cuchillas, para su posterior moldeo y realización de ensayos mecánicos.

➤ Refuerzo aplicado durante el proceso de molienda

Al igual que para el método anterior, se inicia con el calentamiento del medio de disolución para posteriormente agregar las piezas de poliestireno con agitación manual constante. Una vez el material se compacta es pre-moldeado.

Las muestras obtenidas son llevadas a la prensa hidráulica y posteriormente al molino de cuchillas para realizar una reducción de tamaño. Al molino se alimenta de forma simultánea el polímero desgasificado y el material de refuerzo, para facilitar su mezcla y obtener tamaños de partícula similares para ambos materiales.

ANEXO E. Evidencia fotográfica

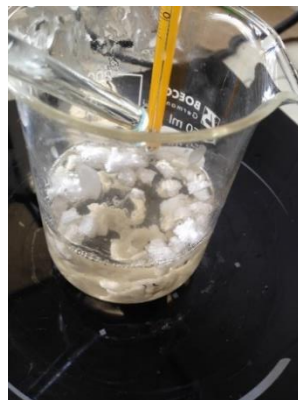
Figura 24. Poliestireno expandido



Figura 25. Aumento de temperatura del medio de calentamiento



Figura 26. A) Piezas de poliestireno en medio de calentamiento. B) Piezas de poliestireno más refuerzo de aserrín en medio de calentamiento.



(A)



(B)

Figura 27. Poliestireno desgasificado



Figura 28. Muestras pre-moldeadas. A) Matriz polimérica pre-moldeada. B) Matriz polimérica con refuerzo de aserrín pre-moldeada.

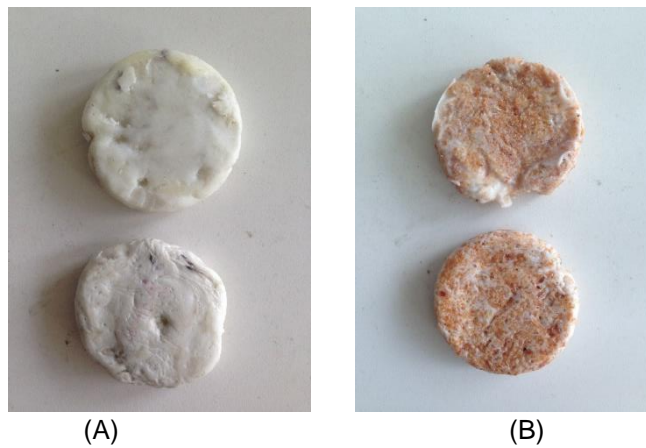


Figura 29. Muestra molida de matriz polimérica reforzada con aserrín durante proceso de desgasificación



Figura 30. Muestra molida de matriz polimérica reforzada con aserrín durante el proceso de molienda



Figura 31. Muestras molidas



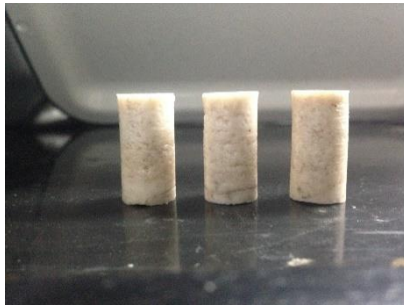
Figura 32. Probetas para pruebas de tensión



Figura 33. Probetas para pruebas de impacto

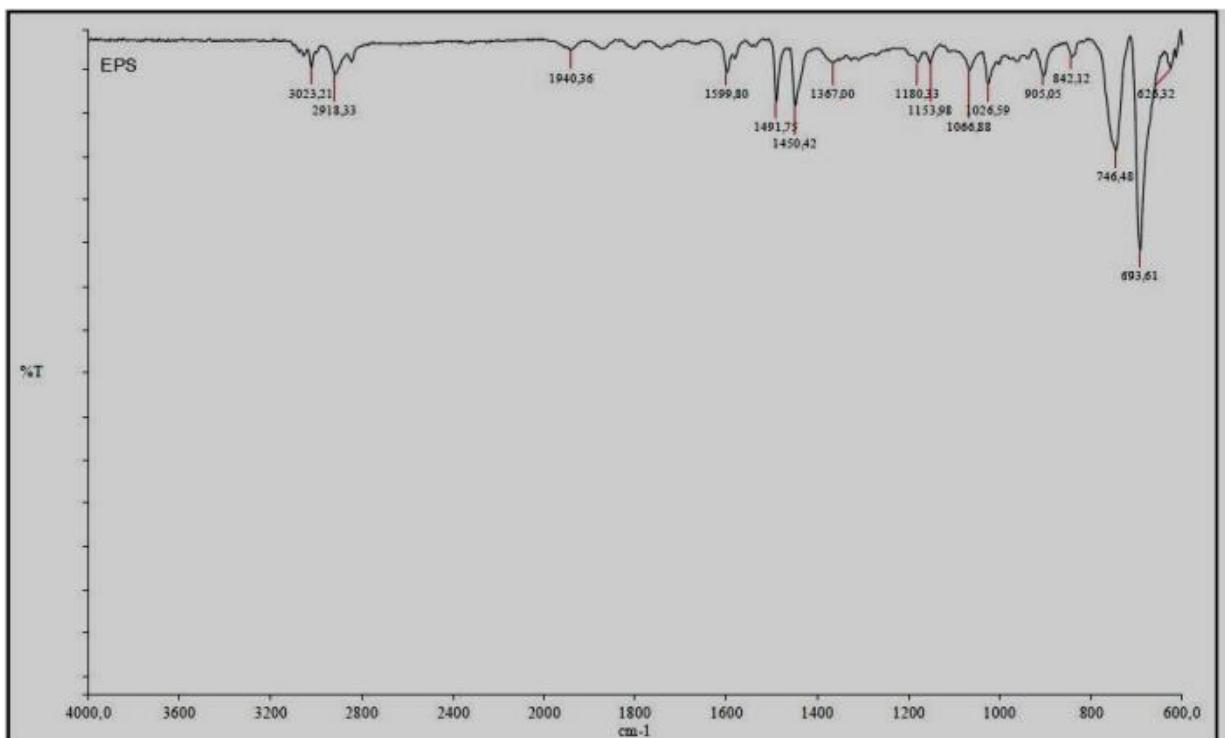


Figura 34. Probetas para pruebas de compresión



ANEXO F. FTIR teórico de poliestireno expandido

Figura 35. FTIR poliestireno expandido reportado en la literatura



Fuente: CASTELLANOS, Yudy y NAVARRO, Silvia [47].

ANEXO G. Resultados FTIR

Figura 36. FTIR medio hidrocarbonado 1

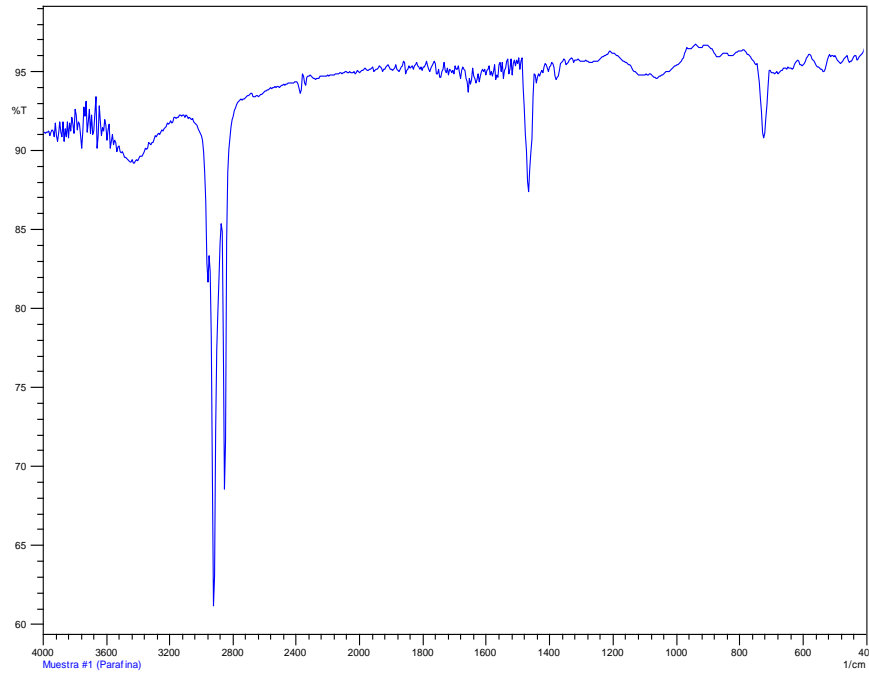


Figura 37. FTIR medio hidrocarbonado 2

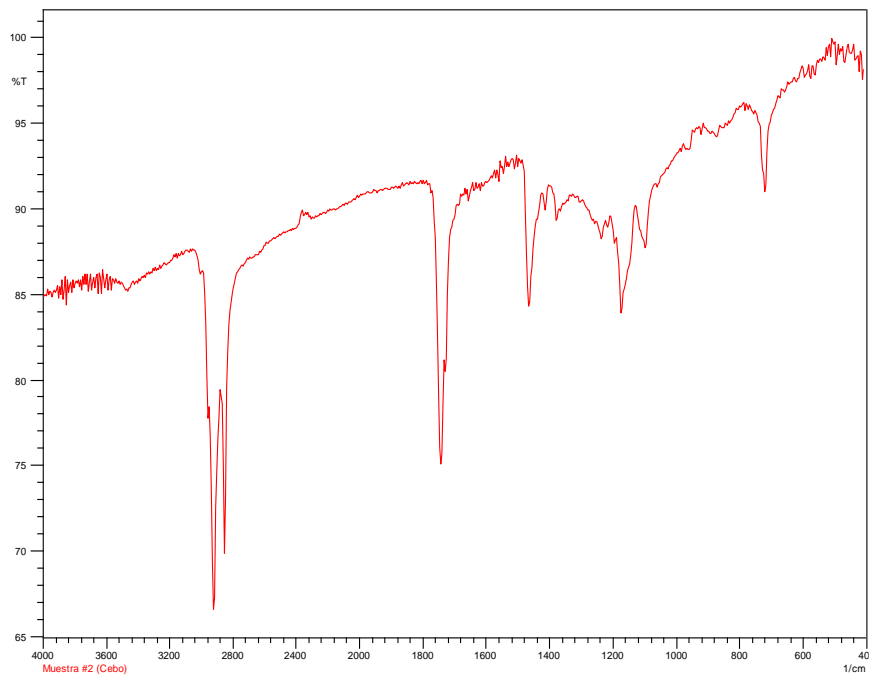


Figura 38. FTIR aserrín

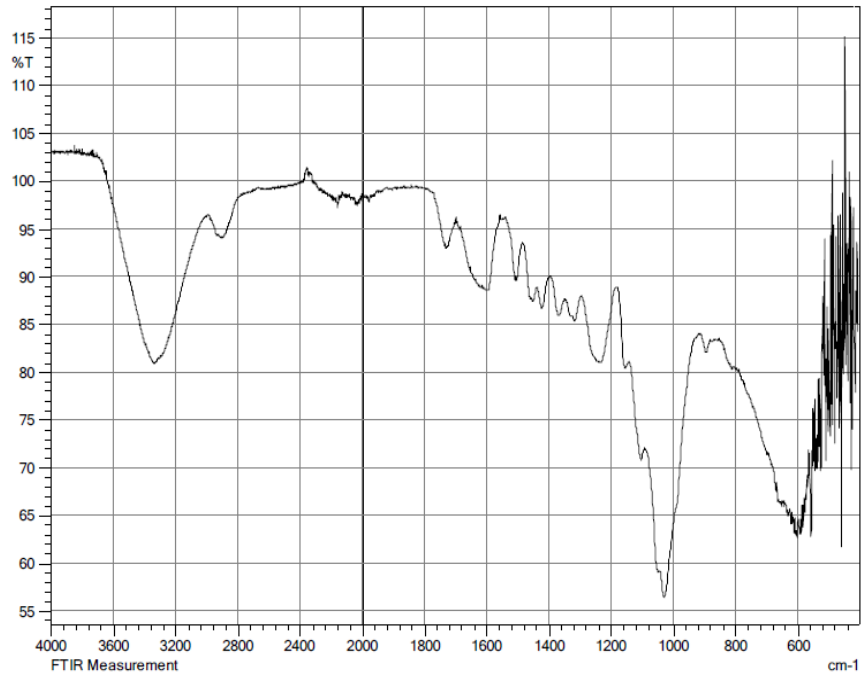


Figura 39. Poliestireno desgasificado en mezcla comparado con poliestireno post-consumo

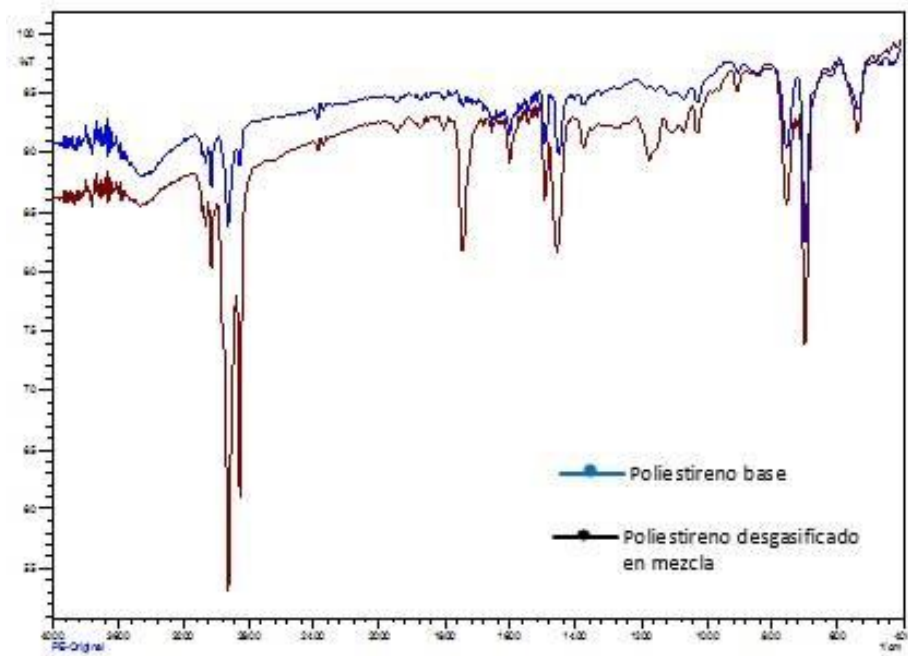
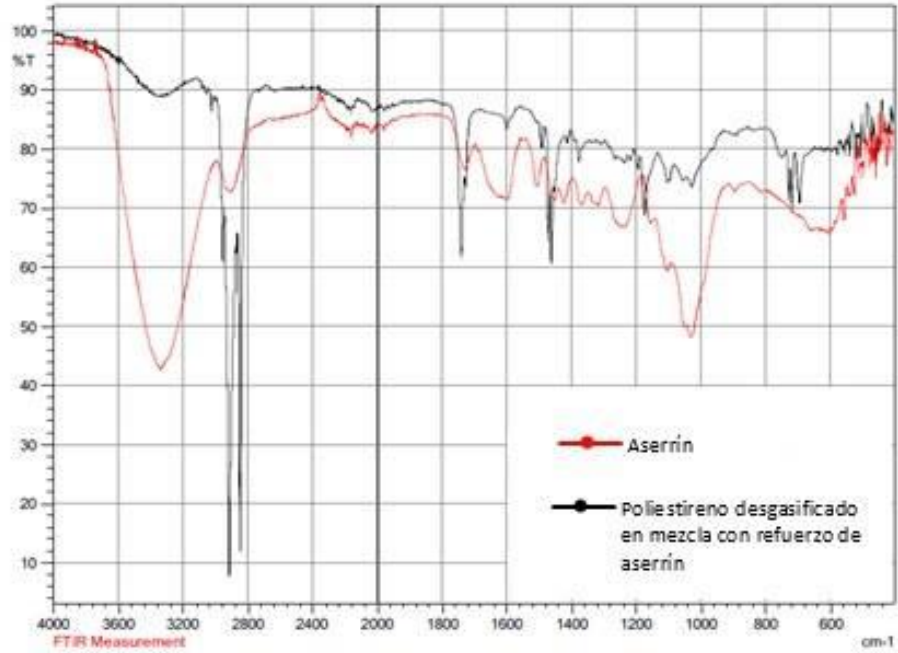


Figura 40. Poliéstireno desgasificado en mezcla con refuerzo de aserrín comparado con aserrín



ANEXO H. Resultados DSC

Figura 41. DSC medio hidrocarbonado 1

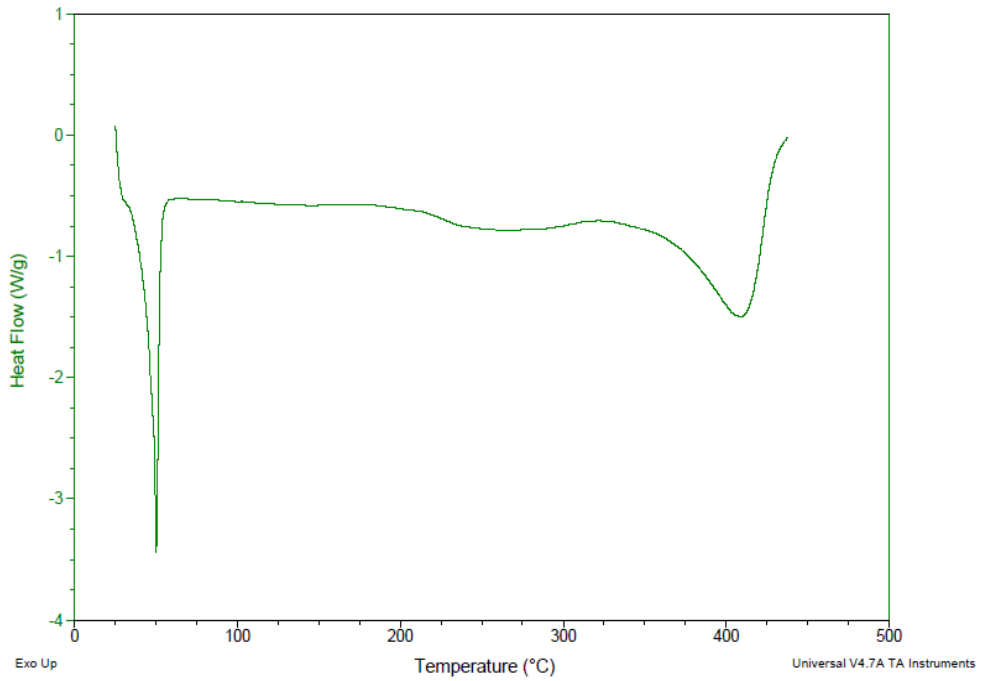


Figura 42. DSC medio hidrocarbonado 2

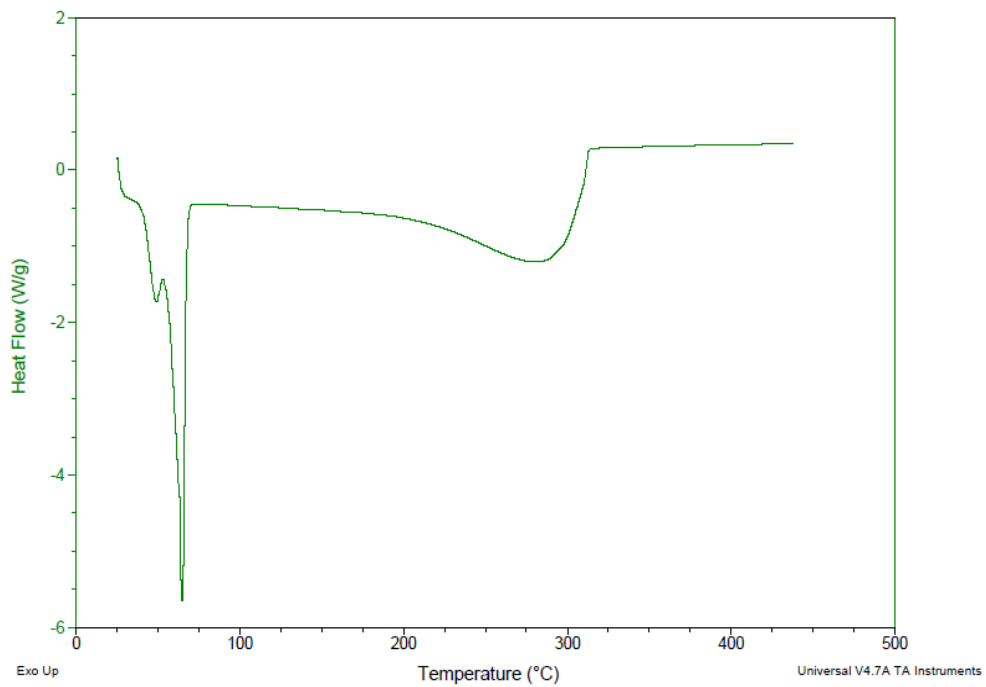


Figura 43. DSC aserrín

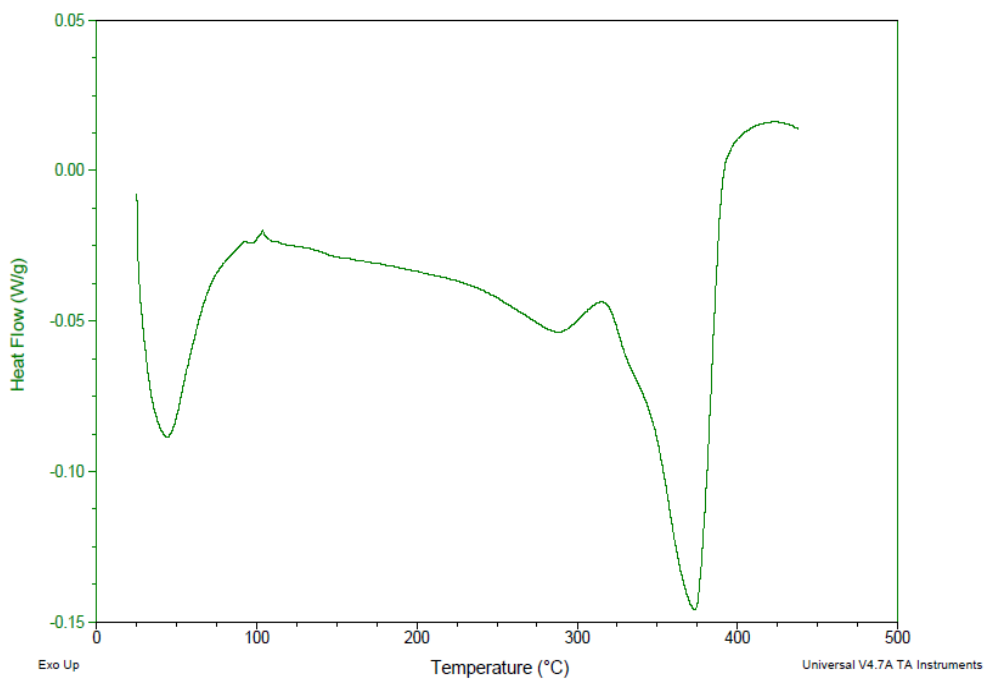


Figura 44. DSC poliestireno desgasificado en mezcla

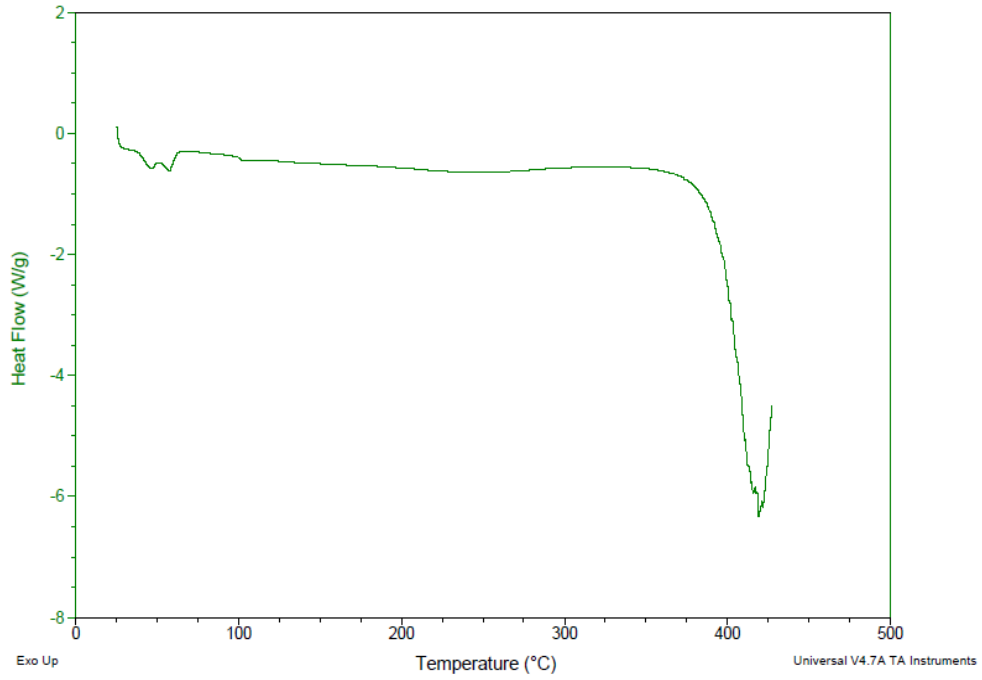
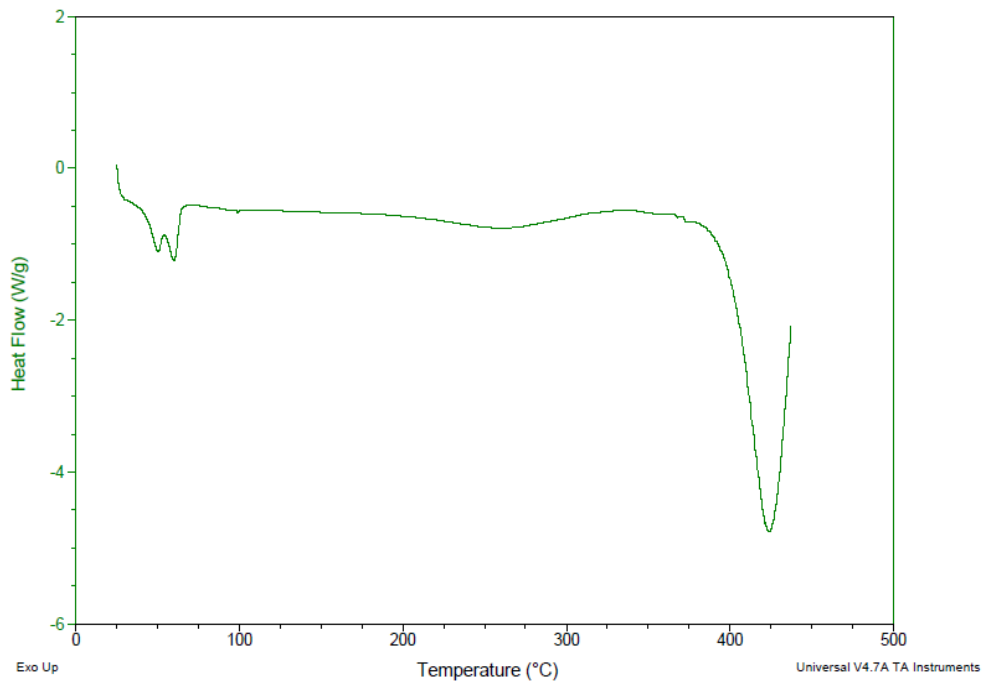
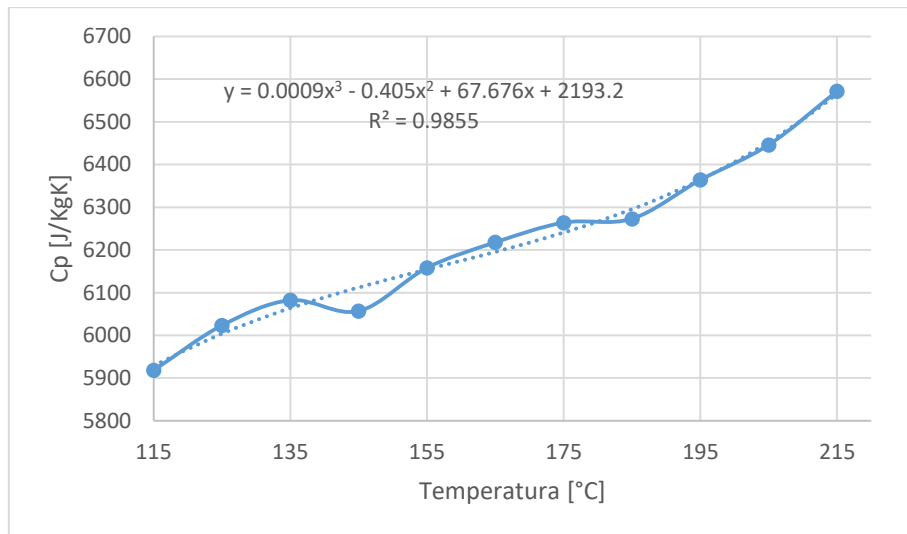


Figura 45. DSC poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de aserrín



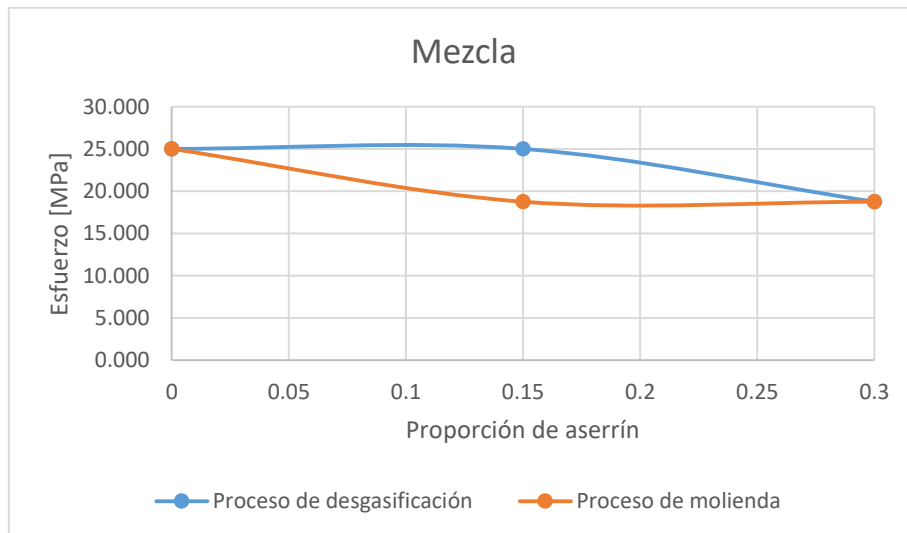
ANEXO I. Capacidad calorífica del poliestireno expandido

Figura 46. Capacidad calorífica del poliestireno expandido



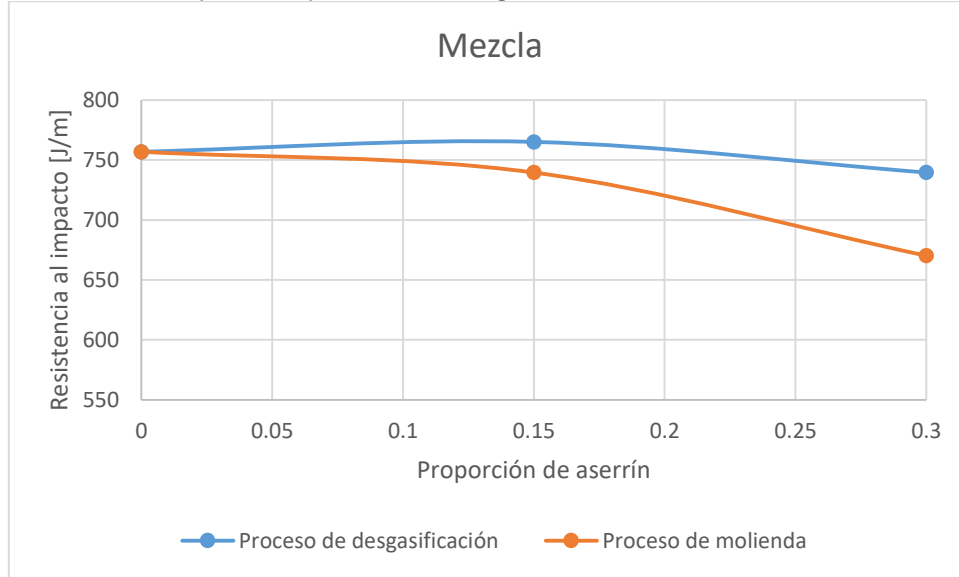
ANEXO J. Resultados pruebas de tensión

Figura 47. Resistencia a la tensión de poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de aserrín



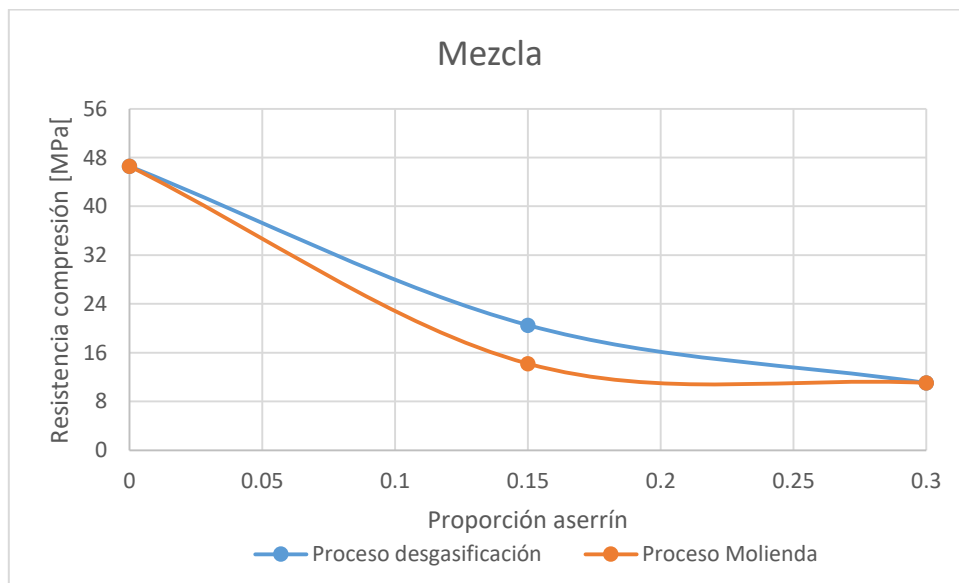
ANEXO K. Resultados pruebas de impacto

Figura 48. Resistencia al impacto de poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de aserrín



ANEXO L. Resultados pruebas de compresión

Figura 49. Resistencia a la compresión de poliestireno desgasificado en mezcla con refuerzo de aserrín



ANEXO M. Porcentajes de compresión

Tabla 13. Porcentajes de compresión

Método de preparación	Medio de calentamiento	Refuerzo [%]	% compresión 1	% compresión 2	% compresión 3
	1	-	1,313	0,944	1,661
	2	-	0,000	0,447	1,324
	Mezcla	-	1,399	0,916	1,335
Refuerzo durante proceso de desgasificación	1	15	1,072	1,440	0,682
	2	15	1,225	0,292	1,486
	Mezcla	15	0,534	0,804	0,988
	1	30	1,009	0,419	1,520
	2	30	0,901	0,376	0,880
	Mezcla	30	1,060	1,293	1,265
Refuerzo durante proceso de molienda	1	15	1,844	1,633	0,831
	2	15	0,782	1,109	0,918
	Mezcla	15	0,890	0,776	1,338
	1	30	1,145	1,167	1,497
	2	30	1,306	0,916	0,860
	Mezcla	30	0,818	1,306	1,102