



CARACTERIZACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO ADHESIVO ASFÁLTICO EMPLEANDO MEZCLAS ACETONA- ACETATO DE ETILO

HEIDER ANTONIO QUINTERO CASTELLANOS

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Medellín, Colombia
2021

CARACTERIZACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO ADHESIVO ASFÁLTICO EMPLEANDO MEZCLAS ACETONA- ACETATO DE ETILO

HEIDER ANTONIO QUINTERO CASTELLANOS

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

D.Sc. Elkin Iván Gutiérrez, IM

Codirector (a):

D.Sc. John Fredy Ríos, IM

Línea de Investigación:

Materiales

Grupo de Investigación:

REM (Research in Energy and Materials)

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Medellín, Colombia

2021

Resumen

Actualmente, la inadecuada gestión de residuos sólidos urbanos genera problemas ambientales por el incorrecto manejo y disposición final de los mismos. Este impacto ambiental se ocasiona principalmente por el gran volumen que requieren para su disposición en los rellenos sanitarios. Dentro de los residuos sólidos encontramos el poliestireno expandido (Expanded PolyStyrene, EPS), el cual es un material que no suele ser reciclado debido a que no se le provee un posprocesamiento adecuado que permita su reprocesado en nuevos productos, a pesar de que existen procedimientos y tecnologías que permiten su reaprovechamiento mediante diversas técnicas de reciclado, entre las que se destacan el reciclado mecánico y el reciclado químico. El presente estudio se enfocó en la reutilización de este material, empleándolo en la fabricación de un adhesivo asfáltico usando diferentes proporciones de acetona/acetato de etilo como solvente. Además, se evaluaron algunas de sus propiedades mecánicas mediante la realización de pruebas de tensión, cizalladura y adhesividad, con objeto de establecer si reúne características adecuadas para que pueda ser empleado como adhesivo en mezclas asfálticas. En función de las pruebas realizadas, se observó que cuando la acetona se encuentra en elevadas concentraciones se presenta una menor pegajosidad, así como, un aumento en la resistencia a la cizalladura y a medida que la concentración de acetona disminuye se da una disminución en la resistencia a la tensión.

Palabras clave: Poliestireno expandido, adhesivo asfáltico, acetona, acetato de etilo, impacto ambiental.

Abstract

Currently, the inadequate management of urban solid waste generates environmental problems due to the incorrect handling and final disposal of the same, this environmental impact is caused mainly by the large volume required for its disposition in sanitary landfills. Within solid waste we find expanded polystyrene (Expanded PolyStyrene, EPS), which is a material that is not usually recycled because it is not provided with an adequate post-processing that allows its reprocessing in new products, despite the fact that there are procedures and technologies that allow its reuse through various recycling techniques, among which mechanical recycling and chemical recycling stand out. The present study focused on the reuse of this material, using it in the manufacture of an asphalt adhesive using different proportions of acetone / ethyl acetate as solvents. In addition, some of its mechanical properties were evaluated by conducting stress, shear and stickiness tests, in order to establish whether it has adequate characteristics so that it can be used as an adhesive in asphalt mixtures. Based on the tests carried out, it was observed that when acetone is in high concentrations, there is less stickiness, as well as an increase in shear resistance and as the concentration of acetone decreases, there is a decrease in resistance to the tension.

Keywords: Expanded polystyrene, asphalt adhesive, acetone, ethyl acetate, environmental impact.

Contenido

	Pág.
Resumen	3
Abstract	4
Capítulo 1 Caracterización del poliestireno expandido (EPS) como adhesivo asfáltico empleando mezclas acetona-acetato de etilo.	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Formulación del problema	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Justificación	5
1.5. Delimitaciones	6
1.5.1. Geográfica	6
1.5.2. Conceptual	6
1.5.3. Operativa	6
Capítulo 2 Marco referencial	8
2.1. Marco histórico	8
2.1.1. Historia del poliestireno expandido	8
2.1.2. Experiencias de los procesos de reciclaje EPS	8
2.1.3. El poliestireno expandido en la fabricación de adhesivos	9
2.2. Marco conceptual	10
2.3. Marco teórico	11
2.3.1. Contaminación por residuos sólidos y su impacto	11
2.3.2. Caracterización del poliestireno expandido y su reciclaje	15
2.3.4. Adhesivos asfálticos	22
2.4. Marco legal	24
2.4.1. ASTM D1002 - 99	¡Error! Marcador no definido.

2.4.2.	ASTM A 956 - 002	24
2.4.3.	ASTM D 3121 - 94	29
2.4.4.	ASTM D 3846 - 02	30
Capítulo 3 Metodología		34
3.1.	Tipo de investigación	34
3.2.	Población y muestra	34
3.3.	Técnicas e instrumentos para la recolección de información	35
3.4.	Análisis de información	35
3.5.	Actividades, fases o etapas en la investigación	35
3.5.1.	Fase I	35
3.5.2.	Fase II	36
3.5.3.	Fase III	36
Capítulo 4 Resultados		38
4.1.	Caracterizar las propiedades mecánicas del residuo de poliestireno expandido (EPS), al ser disuelto empleando diferentes composiciones de acetona-acetato de etilo	38
4.1.1.	Examinar las propiedades físicas y químicas del EPS mediante la revisión de la literatura para caracterizar el material	38
4.1.2.	Analizar los factores de disolución del EPS para el proceso de reciclaje químico.	41
4.1.3.	Establecer las propiedades mecánicas, de interés para la investigación, del EPS.	41
4.2.	Establecer la proporción acetona-acetato de etilo mediante muestras de laboratorio que permita obtener propiedades mecánicas adecuadas para la elaboración de adhesivo asfáltico a partir de EPS	42
4.2.1.	Estudiar los disolventes acetona-acetato de etilo mediante revisión de la literatura	42
4.2.2.	Dosificar las muestras utilizando variaciones en las proporciones de acetona/acetato de etilo.	43
4.2.3.	Valorar y caracterizar las muestras para los ensayos de laboratorio.	44
4.3.	Caracterizar mecánicamente muestras de laboratorio obtenidas mediante diferentes mezclas de solventes para establecer cuál es la que presenta las mejores propiedades para un adhesivo asfáltico.	45
4.3.1.	Realizar las pruebas de tensión, pegajosidad, cizalladura y dureza para el material adhesivo de EPS.	45

4.3.2. Evaluar las propiedades mecánicas mediante las fuerzas, esfuerzos y la desviación estándar analizados en los ensayos mecánicos para seleccionar cuál muestra permite mejores resultados.	48
4.3.3. Efectuar una comparación entre el adhesivo asfáltico estudiado y un adhesivo tomado de la literatura.	53
Conclusiones	55
Recomendaciones para trabajos futuros	56
Referencias bibliográficas	57

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Diferentes tipos de residuos generados en la sociedad.	13
Figura 2-2: Botadero a cielo abierto de residuos inertes y no peligrosos.	14
Figura 2-3: Tipos de residuos industriales.	15
Figura 2-4: Planta de eliminación de residuos (Incineradora).	16
Figura 2-5: Estructura molecular del poliestireno expandido.	17
Figura 2-6: Molino de reciclaje de EPS	21
Figura 2-7: Maquina de reciclado por aglutinamiento.	22
Figura 2-8: Disolución de EPS en acetato de etilo.	23
Figura 2-9: Esquema de incineración.	23
Figura 2-10: Forma y dimensiones de la probeta de ensayo.	28
Figura 2-11: Dispositivo de impacto D.	30
Figura 2-12: Aparato de prueba de adhesión.	31
Figura 2-13: Muestra y plantilla de carga para prueba de cizallamiento en el plano.	34
Figura 4-1: Solubilidad del poliestireno en varios solventes.	41
Figura 4-2: Estructura del acetato de etilo.	44
Figura 4-3: Formula química estructural de la acetona.	44
Figura 4-4: Disolución del EPS en la mezcla acetona/acetato de etilo.	46
Figura 4-5: Montaje para la prueba de pegajosidad.	47
Figura 4-6: Montaje para la prueba de cortante.	47
Figura 4-7: Montaje para la prueba de tensión.	48
Figura 4-8: Huella de indentación de la prueba de dureza.	48
Figura 4-9: Grafico de fuerza máxima (resultados prueba de tensión).	49
Figura 4-10: Grafico de esfuerzo máximo (resultados prueba de tensión).	50
Figura 4-11: Grafico de resultados de la prueba de pegajosidad.	50
Figura 4-12: Grafico del esfuerzo máximo cortante (Prueba de resistencia a la cizalladura).	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Resumen de las propiedades físicas del poliestireno expandido.	19
Tabla 2-2: Propiedades químicas	20
Tabla 2-3: Tipos de tratamientos del poliestireno expandido.	21
Tabla 4-1: Propiedades mecánicas.	39
Tabla 4-2: Propiedades físicas.	40
Tabla 4-3: Designación de las distintas mezclas de solventes.	45
Tabla 4-4: Resultados de la prueba de tensión (Fuerza máxima).	49
Tabla 4-5: Resultados de la prueba de tensión (Esfuerzo máximo).	49
Tabla 4-6. Resultados de la prueba de pegajosidad.	50
Tabla 4-7: Resultados de la prueba de resistencia a la cizalladura.	51

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A_e	Ancho del espécimen	m	Ec. 2.2
F_{ty}	Punto de fluencia del metal	Pa	Ec. 2.1
$F_{máx}$	Carga cortante máxima	N	Ec. 2.2
L	Longitud de superposición	m	Ec. 2.1
L_F	Longitud del área fallada	m	Ec. 2.2
t	Espesor del metal	m	Ec. 2.1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
δ_d	Fuerzas de dispersión	(MPa) ^{1/2}	Ec. 4.1
δ_h	Puentes de hidrogeno	(MPa) ^{1/2}	Ec. 4.1
δ_p	Fuerzas dipolares	(MPa) ^{1/2}	Ec. 4.1
δ_v	Parámetro de solubilidad	(MPa) ^{1/2}	Ec. 4.1
τ	Resistencia al cizallamiento promedio	Pa	Ec. 2.1
τ_{plano}	Cortante en el plano de resistencia	Pa	Ec. 2.2

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>ASTM</i>	Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales
<i>BASF</i>	Empresa química multinacional
<i>EPS</i>	Poliestireno expandido
<i>GPPS</i>	Poliestireno uso general
<i>HIPS</i>	Poliestireno alto impacto
<i>UV</i>	Ultravioleta
<i>XPS</i>	Poliestireno extruido

Introducción

Desde hace algunos años, el fenómeno de calentamiento global ha ido incrementando debido principalmente al crecimiento poblacional, de ciudades e industrias y al desarrollo de la economía mundial. Dicho fenómeno es ocasionado por diferentes actividades que generan un alto volumen de residuos contaminantes que día a día tornan más complejas las condiciones ambientales en las grandes ciudades del mundo, lo que conlleva a un alarmante incremento en la emisión de gases de efecto invernadero, un problema que se agrava en gran medida debido al mal manejo de los residuos sólidos generados por los seres humanos. No obstante, y a pesar de que la naturaleza trata de contrarrestar los efectos generados por la contaminación de forma autónoma, la humanidad en su afán de mejorar su nivel de vida altera los ecosistemas y sobreexplotan los recursos naturales para la obtención de productos tales como los plásticos, que en muchas ocasiones terminan depositándose en diversos ecosistemas terrestres, o en el mejor de los casos, en los rellenos sanitarios urbanos. (Quintero Peña, 2013)

En Colombia, específicamente, se generan alrededor de 3400 toneladas de plásticos diarios que terminan en basureros municipales, siendo la administración de los residuos rígidos urbanos uno de los más importantes inconvenientes ambientales actualmente (Martínez López & Laines Canepa, 2014). De estos residuos sólidos urbanos, los que mayor impacto ambiental originan son los residuos no biodegradables, ya que su proceso de degradación es tan lento que, en algunos casos, es posible catalogarlos como “eternos”. Dentro de esta clasificación es posible categorizar al poliestireno expandido (EPS), popularmente conocido en nuestro país como icopor, que es un material polimérico ligero, de baja densidad y de bajo costo por lo que es ampliamente utilizado como empaque, y que presenta un incremento anual de consumo del 6% a nivel mundial. (Saltos, Changos, Aldás, & Quiroz, 2015)

El EPS muestra un accionar químicamente inerte, lo que supone que no se degrada en el medio ambiente. Por tanto, a pesar de no ser un contaminante directo de los recursos naturales como el agua, suelo y el aire (Martínez López & Laines Canepa, 2014), se ha

constituido como un grave problema ambiental debido a que, una vez cumple su vida útil (la cual es muy corta), termina siendo incinerado ocasionando graves impactos ambientales si no se cumple con la reglamentación ambiental respectiva, o siendo tratados químicamente, implicando la utilización de disolventes que constituyen un elemento de peligro para el medio ambiente y la salud pública. (Contreras, 2015)

Asimismo, el proceso de reciclaje del EPS presenta complicaciones a nivel de transporte y disposición final, ya que debido a su baja relación peso-volumen, se constituye en un desecho altamente voluminoso, elevando sus costos de transporte hacia los lugares de acopio (Saltos, Changos, Aldás, & Quiroz, 2015). Es de destacar que este material, por sus componentes y ser obtenido del petróleo, es una materia no renovable, es un desecho de prominente, valor igual o mayor que el vidrio en los desechos domésticos y de presencia gradual entre los desechos de la industria y domésticos. (Perdomo, 2002)

En la búsqueda de alternativas de reciclaje del EPS se ha revisado, en investigaciones documentadas, diferentes opciones para diversas aplicaciones. Entre las elecciones probables para el reciclaje de EPS en la actualidad están: reciclado en el desarrollo de producción de EPS, aireación del suelo, elaboración de pegamento y barniz, producción de losetas de EPS y fabricación de diversos productos (zócalos, marcos para imágenes, materiales para construcción). (Arriola Lara & Velásquez Martell, 2013)

La creación de adhesivos a partir de EPS es una de las alternativas de reciclaje que más destacan para minimizar el daño ambiental causado por este residuo y una de las más adecuadas debido a las propiedades de este material. Uttaravalli et al. (2021) afirma “los adhesivos derivados de EPS son adecuados para unir papel, madera, cerámica, materiales a base de arcilla y podrían ser un sustituto potencial para reemplazar los adhesivos comerciales utilizados para unir diversos materiales” (p.319).

En el IX Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales CNCIM (2018) fue presentado el proyecto “Obtención de un Polímero de Alta Adherencia e Hidrofobicidad a base de Poliestireno Expandido Reciclado” por Olivano A., López A. y Paredes M.; en el cual se lleva a cabo un procedimiento para reciclar poliestireno elaborando un adhesivo cuya cualidad de adhesión sobrepasa la de los pegamentos “súper fuertes” que tienen la capacidad de adherir vidrio, cerámica o madera, teniendo como beneficio su producción de bajo valor y su biodegradabilidad. La disolución del EPS se lleva a cabo con solventes

como hexano, acetona, aceite de naranja y acetato de etilo para lo cual se establece en todas las situaciones la proporción que hay entre el volumen óptimo de solvente usado para tal fin y la masa de poliestireno a disolver.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta todos estos antecedentes, la presente investigación gira en torno al estudio del uso potencial del poliestireno expandido - EPS para fabricar un adhesivo asfáltico, con el fin de dar un uso alternativo a este residuo, de manera que se ayude a mitigar el impacto ambiental que presenta este material debido a su uso desmedido e indiscriminado por parte de diversos factores industriales.

Capítulo 1 Caracterización del poliestireno expandido (EPS) como adhesivo asfáltico empleando mezclas acetona-acetato de etilo.

1.1. Planteamiento del problema

El desarrollo urbano y las ocupaciones industriales han incrementado la producción de desechos, sin desarrollar tácticas para la atención a los inconvenientes ambientales relacionados con la actualización en la utilización de los elementos naturales, el avance de programas de rastreo y control para el cumplimiento de las normas ambientales, y la puesta en marcha de programas de modernización y reconversión industrial orientados a incrementar la eficacia ambiental y económica. (Suárez Gómez, 2000).

La contaminación que actualmente se genera a nivel global por los residuos sólidos no reciclados, que debido a su composición presentan una degradación lenta, se ha convertido en una verdadera problemática que requiere de soluciones prácticas y de gran viabilidad a la hora de implementarlas. Un problema en particular es el manejo inadecuado dentro de la recolección y proceso de reutilización del EPS que genera un gran impacto ambiental, teniendo en cuenta que gran parte de la población urbana no cuenta con empresas de reciclaje que examinen y brinden un buen procesamiento de este material polimérico. Debido a la problemática anteriormente expuesta, la presente investigación se centra en la posibilidad de fabricar un adhesivo asfáltico a partir de poliestireno expandido (EPS) empleando mezclas de acetona – acetato de etilo que, debido a sus buenas propiedades mecánicas, sea de una calidad competitiva con los adhesivos comerciales que se encuentran hoy en el mercado.

1.2. Formulación del problema

La investigación en mención procura responder a la siguiente pregunta:

¿Es posible fabricar un adhesivo asfáltico a partir de poliestireno expandido (EPS) empleando mezclas de acetona – acetato de etilo que presente buenas propiedades mecánicas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la utilidad del EPS en la fabricación de adhesivos asfálticos obtenidos a partir de mezclas de acetona – acetato de etilo mediante caracterización mecánica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas del residuo de poliestireno expandido (EPS), al ser disuelto empleando diferentes composiciones de acetona–acetato de etilo.
- Establecer la proporción acetona-acetato de etilo mediante muestras de laboratorio que permita obtener propiedades mecánicas adecuadas para la elaboración de adhesivo asfáltico a partir de EPS.
- Caracterizar mecánicamente muestras de laboratorio obtenidas mediante diferentes mezclas de solventes para establecer cuál es la que presenta las mejores propiedades para un adhesivo asfáltico.

1.4. Justificación

La presente investigación apunta a la reutilización del poliestireno expandido empleándolo en la fabricación de un adhesivo asfáltico, ya que este material al ser ampliamente empleado como material para envasado-embalado y debido a que es fácilmente asequible se le da un uso desmedido, situación que lleva a un grave problema ambiental por los grandes volúmenes de desperdicios que genera y que no suelen ser reciclados o

reutilizados, simplemente terminan aglutinados en rellenos sanitarios durante largos períodos de tiempo. Así, el presente trabajo de investigación permite mostrar una alternativa real y segura para el reciclaje de este material altamente dañino para el medio ambiente, convirtiéndolo, con el adecuado proceso, en un producto de utilidad como lo es un adhesivo asfáltico. Además de lo expuesto anteriormente, este proyecto tiene gran importancia en el área ambiental, y se espera que sirva de punto de partida para posibles trabajos futuros en el tema pues el área de investigación en este tema es muy amplia y las pruebas realizadas son de gran utilidad; también sirve de motivación para incentivar la investigación de nuevas formas de reciclar no solo el EPS sino también otros residuos sólidos.

Un factor no menos importante, es la relevancia económica que puede llegar a tener al ir más allá de la investigación y contemplar un futuro emprendimiento con el producto elaborado (adhesivo asfáltico) a partir de este material reciclado.

1.5. Delimitaciones

1.5.1. Geográfica

El área de actuación del presente proyecto se enmarca dentro del territorio nacional puesto que toda la zona geográfica del país se ve influenciado por la problemática que es tema de estudio. Las respectivas pruebas experimentales y recolección de datos se delimitan a nivel de laboratorio.

1.5.2. Conceptual

En este estudio se establecen los siguientes conceptos claves que engloban el tema central del proyecto: poliestireno expandido, adhesivo asfáltico, acetona, acetato de etilo, impacto ambiental

1.5.3. Operativa

En la recolección de datos de la presente investigación se estudiaron los resultados de los ensayos a nivel de laboratorio, realizadas por triplicado en una máquina universal de ensayos con objeto de caracterizar y clasificar el adhesivo obtenido. El material en estudio

es poliestireno expandido reciclado tratado químicamente por medio de mezclas de solvente acetona/acetato de etilo en diferentes proporciones. Todo esto fue realizado bajo parámetros e indicaciones de las diferentes normas para el caso (ver capítulo 2, marco legal).

Capítulo 2 Marco referencial

2.1. Marco histórico

2.1.1. Historia del poliestireno expandido

El poliestireno es un polímero sintético obtenido del estireno, que es un hidrocarburo líquido desde el cual es producido el poliestireno. Fue producido a finales del siglo XIX del bálsamo de estoraque que llega de un árbol de Asia Menor nombrado “goma dulce oriental”. (Arriola Lara & Velásquez Martell, 2013)

A comienzo del siglo XIX los plásticos sintetizados fueron elaborados de hidrocarburos, su composición facilita polimerizar el material. Se descubrieron espumas plásticas de manera accidental por el Dr. Baekeland químico americano que creó el primer plástico sintético; Baekeland probó mediante fenol y formaldehído, intentado crear una resina no porosa. Es ahí donde sus mezclas empezaron a hacerse espuma, intentó limitar la formación de espuma sin saber las virtudes de este material. Después de la muerte de Baekeland en 1944, se desarrolló una espuma de poliestireno, primero fue una espuma de epoxi y poco tiempo luego se desarrolló la espuma de poliestireno, usada como aparatos de flotación y aislamiento. En ese momento el EPS sustituyó al capoc y papel, los empaques naturales espumados se volvieron tan populares como es hasta la actualidad. (Arriola Lara & Velásquez Martell, 2013)

2.1.2. Experiencias de los procesos de reciclaje EPS

El reciclaje del poliestireno expandido (EPS) actualmente consiste en la reducción del tamaño del grano y disminución del gas que contiene, lo que permite disminuir su volumen. La viabilidad del reciclaje aumenta dada la disminución de este residuo y el bajo impacto ambiental generado en el proceso de recuperación. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)

En el proceso de reciclaje los desechos de EPS pierden su característica de espuma, al ser compactados pueden fabricar juguetes, artículos de oficina, madera plástica, recipientes y EPS nuevamente. Si los desechos son fraccionados son usados en la

construcción, procesos de floculación como sustrato y la obtención de fibras naturales, carbonatos y nanopartículas con buenas propiedades mecánicas. (Quiroz, Chango, Saltos, & Aldas, 2015)

En nuestro país, la compañía Natura y la Facultad de Antioquia son pioneras en administrar los residuos de poliestireno. El régimen es ejecutado por procedimientos pirolíticos, ocasionando desventajas como el uso de energía excesiva, producción de subproductos y emisión atmosférica, aun sin un destino último en el mercado. La Fundación Verde Natura “reciclamos EPS para un mundo mejor”, contribuye al ámbito una opción de reciclaje del EPS y poliestireno extruido que ayuda a reducir la contaminación ambiental. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)

2.1.3. El poliestireno expandido en la fabricación de adhesivos

A partir de la búsqueda exhaustiva de literatura sobre la utilización de EPS de desecho, se observa que hay algunos estudios disponibles sobre el desarrollo de un material adhesivo-pegamento a partir de EPS de desecho para diversas aplicaciones, los cuales presentan el análisis cuantitativo y los detalles de caracterización de los adhesivos derivados de EPS. Una comparación de propiedades del adhesivo basado en EPS con el adhesivo comercial está disponible en la literatura. (Naidu Uttaravalli, y otros, 2021)

La revisión de la literatura permite citar algunos de los trabajos hechos como antecedentes del problema en estudio y son los siguientes:

En el presente estudio, los materiales adhesivos de bajo costo se preparan valorizando un poliestireno expandido (EPS) posconsumo (residuo). Los adhesivos se preparan disolviendo el EPS residual en seis disolventes diferentes. Se caracterizan en detalle diversas propiedades físico-químicas tales como solubilidad, contenido de humedad, viscosidad, resistencia del adhesivo (cizallamiento), módulo de cizallamiento, etc. de los adhesivos. (Naidu Uttaravalli, y otros, 2021)

Del estudio experimental se observa que a partir de la gasolina y el tolueno se pueden producir adhesivos de buena calidad. Por lo tanto, se concluye que la conversión de poliestireno expandido residual en adhesivo es una solución económica, ecológica y técnicamente eficiente. (Selukar, Chaitanya, & Ingole, 2014)

En el proyecto titulado “obtención de un polímero de alta adherencia e hidrofobicidad a base de poliestireno expandido reciclado” se muestra el avance de un procedimiento para reciclar Unigel creando un pegamento cuya característica de adhesión sobrepasa la de los pegamentos nombrados “súper fuertes” que tienen la posibilidad de adherir vidrio, cerámica o madera, teniendo como virtud su producción de bajo valor y su biodegradabilidad. En todas las situaciones siguientes se establece la proporción que hay entre la masa de EPS a disolver y el volumen óptimo de solvente usado para tal fin: disolución del poliestireno con solventes como acetona, hexano, acetato de etilo y aceite de naranja puro estableciendo. (Olivano Esquivel, López Gonzáles, & Paredes Olguín, 2018)

Todos los antecedentes anteriormente descritos sirven como base para la investigación puesto que guardan gran similitud con el presente proyecto el cual es: reciclar el poliestireno expandido para fabricar adhesivo. Los procesos mencionados son los llevados a cabo en esta investigación (emplear solventes para disolver el EPS y luego la realización de pruebas al adhesivo). Difieren en la empleabilidad para la que se proyecta el adhesivo.

2.2. Marco conceptual

A continuación, se definen cada uno de los términos claves tratados en la investigación.

Poliestireno expandido: Es un material inerte e inocuo derivado del poliestireno que posee excelentes cualidades como la protección contra impactos, el aislamiento térmico, ligereza y facilidad de conformado ampliamente utilizado en diferentes sectores. (Samper, Rico, & Ferrandiz, 2008)

Adhesivo asfáltico: es un tipo de pegante utilizado para permitir la adhesión entre una superficie y materiales como mantos asfálticos. (Tomado del blog de la empresa Mavegsa)

Acetona: Sustancia volátil y muy soluble en agua. Compuesto orgánico que tiene bajo punto de ebullición, producido de forma natural en plantas, arboles, incendios forestales y obtenido de la disgregación de la grasa corporal. (Camacho Morales, 2017)

Acetato de etilo: disolvente ampliamente utilizado en la industria. Este disolvente es elaborado comúnmente llevando a cabo una reacción de condensación de etanol y ácido acético. (González Montiel, 2015)

Impacto ambiental: conjunto de efectos nocivos para los ecosistemas, el clima y la sociedad, consecuencia de actividades como la extracción de recursos naturales, la disposición incorrecta de residuos, la emisión de contaminantes y el cambio de utilización del suelo. (Perevochtchikova, 2013)

Residuos sólidos urbanos: son generados en los núcleos urbanos o en sus zonas de dominio: comercios, domicilios particulares, y oficinas, son materiales desechados después de cumplida su vida útil, y que, por lo general, si no son tratados y dispuestos adecuadamente carecen de valor financiero y por el contrario impurifican los suelos y cuerpos de agua. (Runfola & Gallardo, 2009)

Resistencia a la cizalladura: propiedad que mide el esfuerzo de cizalladura máximo en el adhesivo antes de la rotura bajo carga de torsión. (Tomado del blog de la empresa Instrom)

Dureza: la resistencia que opone el material a su deformación plástica permanente por rayado o penetración. (Hermenegildo Rodriguez Galbarro, 2017)

Pegajosidad: capacidad de una superficie adhesiva para fluir, deformarse y empapar otra superficie desde el instante en que entra en empalme con ella, generando una unión. (ASTM-D3121, 1994)

2.3. Marco teórico

2.3.1. Contaminación por residuos sólidos y su impacto

Un desperdicio sólido es algún material, sustancia, objeto o elemento sólido final del consumo o uso de un bien en ocupaciones comerciales, domésticas, institucionales, industriales, o de servicios, que el generador deja, repudia o hace entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor monetario o de disposición final (ver figura 2-1). (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008)

En los años anteriores se ha cuadruplicado la producción de desperdicios rígidos en los hogares. La producción de residuos es inversamente proporcional al del avance del país. El hombre por medio del tiempo fue un agente alterador de su ámbito, la eventualidad de hoy respecto del manejo de los residuos rígidos crea contaminación ambiental y tiene su origen en la necesidad que desarrolló la persona de industrializar el planeta. Las ocupaciones humanas tuvieron un desacierto dentro del planeta dejando como resultado, inconvenientes medioambientales como la contaminación. (Rodriguez, 2011)



Figura 2-1: Diferentes tipos de residuos generados en la sociedad.

Fuente: (Cabildo Miranda, y otros, 2012)

Reseña histórica

La forma más simple que descubrió el hombre de tener desechos no comibles por los animales fue tirarlos en un sitio cercano a su vivienda; de esta forma surgió el botadero a cielo abierto (ver figura 2-2), costumbre que se mantuvo hasta nuestros días. Los residuos se convirtieron en un inconveniente mientras el hombre se volvió gregario y se concentró en localidades. (Rodriguez, 2011)



Figura 2-2: Botadero a cielo abierto de residuos inertes y no peligrosos.

Fuente: (Cabildo Miranda, y otros, 2012)

El desarrollo acelerado en los años anteriores, y la industrialización han incrementado la generación de residuos. Hace 30 años, la generación de residuos por persona era de unos 200 a 500 gr/hab/día, en tanto que hoy se cree entre 500 y 1000 gr/hab/día. Pero el inconveniente no radica únicamente en la cantidad sino además en la calidad o estructura que pasó de ser densa y totalmente orgánica a ser voluminosa, medianamente no biodegradable y con porcentajes crecientes de materiales tóxicos. (Rodríguez, 2011)

Clasificación de los residuos

Los residuos se pueden clasificar de varias formas:

Clasificación por estado: es definido según el estado físico en que se encuentre. Existe tres tipos de residuos: sólidos, líquidos y gaseosos. El alcance real de esta clasificación puede fijarse en términos descriptivos o según la forma de manejo asociado. (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008)

Clasificación por origen: Se puede definir el residuo por la actividad que lo origine, esencialmente es una clasificación sectorial. Según esta clasificación, los tipos de residuos más importantes se presentan en la Figura 2-3.

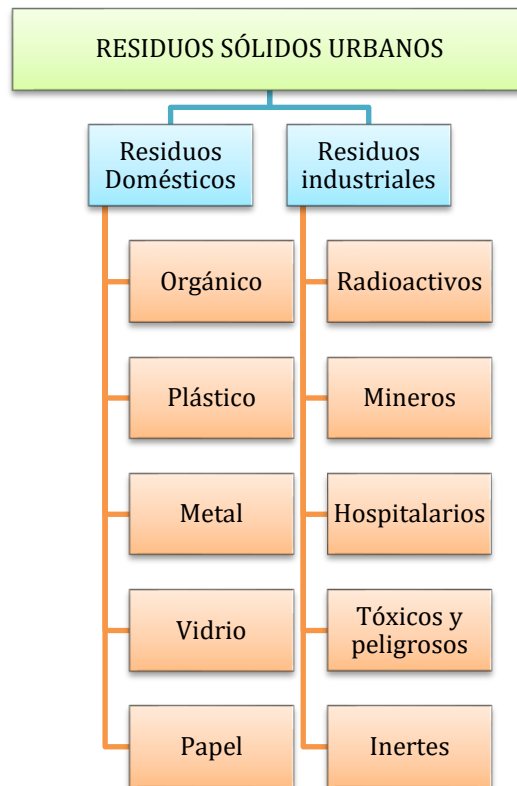


Figura 2-3: Tipos de residuos industriales.

Fuente: Autor del proyecto.

Clasificación por tipo de manejo: Se clasifican por presentar alguna característica asociada al manejo que debe ser realizado, así: peligroso e inerte. (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008)

El impacto ambiental negativo de los residuos solidos

La contaminación debe ser estudiada, dominada y tratada a fin de mitigar los efectos ocasionados por la adición de sustancias y maneras de energía al medio ámbito. Tienen que establecerse tácticas tendientes a propender por la conservación de los seres vivos y orientar su relación con el medio a fin de guardar la biodiversidad que existe. La visible inexistencia o falta de conciencia sobre el daño de las basuras en el medio desarrollan una contaminación importante. La incineración a cielo abierto de basura ocasiona la emisión de diferentes contaminantes (ver Figura 2-4). (Rodríguez, 2011)



Figura 2-4: Planta de eliminación de residuos (Incineradora).

Fuente: (Cabildo Miranda, y otros, 2012)

Políticas nacionales para el manejo de residuos sólidos

En Colombia se ha intentado reglamentar el manejo de residuos sólidos por medio de la ley 99 de 1993, la ley 192 de 1994 y el documento CONPES 2750 del Ministerio del Medio Ambiente, mediante los cuales se pretende minimizar la problemática que afecta principalmente al medio ambiente y consecuentemente a la sociedad. Esas normatividades buscan minimizar la cantidad de residuos que se generan, aumentar el aprovechamiento racional de dichos residuos y el mejoramiento de los sistemas de eliminación, tratamiento y disposición de residuos sólidos. (Rodríguez, 2011)

Empresas de reciclaje en Colombia

A continuación, se presenta la descripción de tres empresas importantes de reciclaje de Colombia del grupo que hay hoy legalmente constituido en el país.

- ***SMURFIT KAPPA CARTÓN DE COLOMBIA S.A.***
- ***Fibras Nacionales S.A.S.***
- **RESIDUOS ECOEFICIENCIA S.A.S.**

2.3.2. Caracterización del poliestireno expandido y su reciclaje

El método convencional más utilizado para la obtención de poliestireno expandido es a partir de la transformación del poliestireno expandible, esta materia prima es un polímero

del estireno que contiene un agente expansor, el pentano (ver figura 2-5). Se preparan perlas de PS por suspensión, durante el moldeo se calientan, lo que ocasiona una expansión, produciendo unas bolitas de muy baja densidad, que se funden conjuntamente y se adaptan al molde. (Dávalos Murray, 2015)

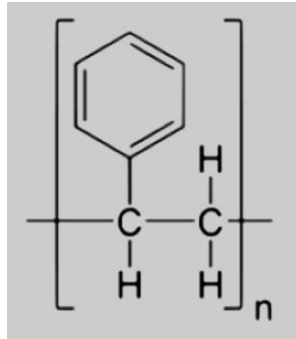


Figura 2-5: Estructura molecular del poliestireno.

Fuente: (Arcila & Miranda Giraldo, 2015)

Propiedades generales del poliestireno expandido

Propiedades físicas

Densidad: Los productos y artículos acabados en EPS se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros, aunque resistentes. En función del uso las densidades se sitúan en el intervalo que va desde los 10 kg/m³ hasta los 50 kg/m³. (Dávalos Murray, 2015)

Resistencia mecánica: La resistencia a los esfuerzos mecánicos de los productos de poliestireno se valoran por medio de las siguientes propiedades: resistencia a la compresión para una deformación del 10%, resistencia a la flexión, fluencia a compresión, resistencia a la tracción y resistencia a la cizalladura o esfuerzo cortante. (Dávalos Murray, 2015)

Aislamiento térmico: El EPS muestra una notable cualidad de aislamiento, debido a su composición en la que incorpora aire ocluido en una composición celular conformada por el poliestireno. (Dávalos Murray, 2015)

Comportamiento frente al agua: El EPS no es higroscópico. Al sumergir el material en agua los topes de absorción son bajos (1-3%). (Dávalos Murray, 2015)

Estabilidad dimensional: Estas variantes se determinan por medio del coeficiente de dilatación térmica que, para los productos de poliestireno expandido, que no dependen de la consistencia (0,05 y 0,07 mm). (Dávalos Murray, 2015)

Estabilidad frente a la temperatura: El rango de temperaturas del EPS se maneja con seguridad entre 80 - 100 °C sin que sus características cambien, de modo que no posee limitación alguna por el radical inferior (excepto las variantes dimensionales por contracción).

En relación al radical superior el límite de temperaturas de uso se coloca cerca de los 100 °C para acciones de corta duración, y cerca de los 80 °C para acciones continuadas y con el material sometido a una carga de 20 kPa. (Dávalos Murray, 2015)

Comportamiento frente a factores atmosféricos: Bajo la acción prolongada de luz ultravioleta, el área del poliestireno expandido amarillea y se torna débil, de forma que la lluvia y el viento logran erosionarla. Gracias a que estos efectos sólo se detallan tras la exposición prolongada a la radiación ultravioleta, en la situación de las aplicaciones de embalaje y envase no es objeto de consideración o a tener en cuenta. (Dávalos Murray, 2015)

En la tabla 2-1 se presenta un resumen de las propiedades físicas del EPS.

Tabla 2-1: Resumen de las propiedades físicas del poliestireno expandido.

Propiedad	Unidades	Rango
Densidad nominal	kg/m^3	10-35
Densidad mínima	kg/m^3	9-31,5
Conductividad térmica (10°C)	$\frac{mW}{m \cdot K}$	33-46
Tensión por compresión con deformación al 10%	kPa	25-30
Resistencia a la compresión al 10%	kPa	15-70
Resistencia a la flexión	kPa	50-375

Resistencia de cizallamiento	<i>kPa</i>	25-184
Resistencia a la tracción	<i>kPa</i>	<100-580
Módulo de elasticidad	<i>MPa</i>	<15-108
Indeformabilidad al calor instantáneo	$^{\circ}C$	100
Indeformabilidad al calor duradero	$^{\circ}C$	80
Coefficiente de dilatación térmica lineal	$\frac{1}{K}$	5-7
Capacidad térmica específica	J	1210
Clase de reacción al fuego	-	M1-M4
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 7 días	%(vol.)	0.5-1,5
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 28 días	%(vol.)	1-3

Fuente: (Dávalos Murray, 2015)

Propiedades químicas

El poliestireno expandido es permanentemente estable frente a varios elaborados químicos. Si se usan adhesivos, pinturas disolventes y vapores concentrados de estos productos, hay que aguardar un ataque de estas sustancias. En la Tabla 2-2 se señalan más detalles sobre la seguridad química del poliestireno expandido. (Dávalos Murray, 2015)

Tabla 2-2: Estabilidad del poliestireno frente a varios solventes.

Sustancia activa	Estabilidad
Solución salina (agua de mar)	Estable
Jabones y soluciones tensoactivos	Estable
Lejía	Estable
Ácidos diluidos	Estable
Soluciones alcalinas	Estable
Disolventes orgánicos (acetonas, esterés)	Estable
Hidrocarburos alifáticos saturados	Estable
Aceites de parafina y vaselina	Relativamente estable
Aceites de diésel	Estable
Carburantes	Estable
Alcoholes (metanol, etanol)	Estable
Aceites de silicona	Relativamente estable
Ácidos concentrados	Estable

Fuente: (Dávalos Murray, 2015)

Propiedades biológicas

El EPS no enmohece, es imputrescible, y no se descompone. No se ve atacado por los microorganismos del suelo. Los productos de poliestireno expandido cumplen con las demandas sanitarias y de seguridad e higiene establecidas, con lo que tienen la posibilidad de usarse con seguridad en la construcción de objetos de embalaje premeditados al contacto alimenticio. Con respecto al efecto de la temperatura, mantiene las dimensiones equilibradas hasta los 85 °C. (Dávalos Murray, 2015)

2.3.3. Tratamientos y reciclaje del poliestireno expandido

Las elecciones de régimen se clasifican en primario, secundario, terciario y cuaternario, permiten el reciclaje del material. En la Tabla 2-3 se aprecia las técnicas más utilizadas. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)

Tabla 2-3: Tipos de tratamientos del poliestireno expandido.

Tipo de tratamiento	Técnica
Primario	Manual - Mecánico

Secundario	Aglutinamiento
Terciario	Tolueno, Benceno, Cloroformo, Tetrahidrofurano, D-limoneno, P-Cimeno
Cuaternario	Producción de energía

Fuente: (Arthuz López & Perez Mora, 2019)

Tratamiento primario o mecánico

Los embalajes y envases resultado del posconsumo tienen la posibilidad de reutilizarse a través de la trituration (ver Figura 2-6), ya que posibilita la supresión del espumado y su utilización en productos nuevos, debido a que este material no pierde las propiedades químicas iniciales. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)



Figura 2-6: Molino de reciclaje de EPS

Fuente: (Quintero Peña, 2013)

Tratamiento secundario o por aglutinamiento

Radica en calentar el material, aglutinarlo y constituir un bloque del mismo. Al acoplar el material a favor del calor se merma el volumen del mismo, pero conlleva al consumo de bastante energía en el proceso. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)

Reside en precalentar las partículas de plástico en un cesto giratorio (ver Figura 2-7), para que al rodar a altas velocidades se precalienten las partículas y estas se acoplan para unirse y constituir un solo conjunto de material, disminuyendo volumen, pero utilizando considerable energía. (Quintero Peña, 2013)



Figura 2-7: Maquina de reciclado por aglutinamiento.

Fuente: (Quintero Peña, 2013)

Tratamiento terciario o químico

Basado en la utilización de solventes para solubilizar el material, conforme con su particularidad de polaridad empleando un solvente con igual propiedad (ver Figura 2-8). Según García et al., (2009), el EPS es un compuesto apolar, por lo mismo, para el procedimiento de reciclaje terciario, se debe emplear un solvente apolar para llegar a crear soluciones, dando características adecuadas y alcanzando soluciones saturadas, asegurando la disolución general del material. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)



Figura 2-8: Disolución de EPS en acetato de etilo.

Fuente: (Arriola Lara & Velásquez Martell, 2013)

Tratamiento cuaternario o energético

Trata de la quema del material con el objetivo de producir energía (ver Figura 2-9), proceso que es bastante criticado socialmente por los inconvenientes ambientales que puede causar. Esta técnica es atractiva viendo la recuperación de energía de los materiales plásticos, los cuales tienen como propiedad un alto poder calorífico. Este procedimiento de combustión debe estar supeditado a fuertes controles de emisiones para anular los desechos sólidos y los efluentes gaseosos que podrían impactar negativamente al medio. (Arthuz López & Perez Mora, 2019)

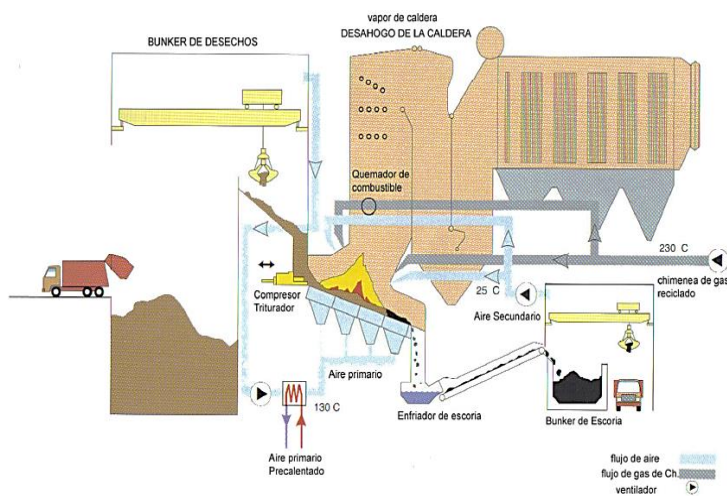


Figura 2-9: Esquema de incineración.

Fuente: (Wong, 2006)

2.3.4. Adhesivos asfálticos

Es un tipo de aglutinante que se usa, principalmente, para permitir la adhesión entre una superficie y materiales como mantos asfálticos. Elegir un adhesivo asfáltico de calidad es lo que marca la diferencia entre proyectos duraderos, con buenos acabados, de los que no. (Tomado del blog de la empresa Mavegsa)

Usos de los adhesivos asfálticos

Se emplean comúnmente para reparar grietas y fisuras. El procedimiento para este uso es como sigue, se hace un agrandamiento de la grieta, luego la limpieza de suciedad y polvo utilizando agua y con ayuda de una espátula aplicar el pegamento asfáltico. Esta clase de

material es útil también para reparar mortero de hormigón, pisos industriales, etc. El adhesivo se utiliza para pegar parquet y cerámica, calafatear herramientas metálicas (como carretillas) o vehículos, se emplea en protección de estructuras metálicas, cables metálicos, postes de hormigón, y un sin número de propósitos más. (Tomado del blog de la empresa Mavegsa)

En el campo agrícola también tiene utilidad, puesto que puede ser empleado para la protección de heridas en los frutales. Además, es utilizado en ganadería para la protección de las pezuñas de los animales. También es necesario en la imprimación de superficies antes de la instalación de mantos asfálticos. Su uso asegura la impermeabilización del área, la promoción de la adherencia con la membrana asfáltica y el endurecimiento de losas. (Tomado del blog de la empresa Mavegsa)

Propiedades de los adhesivos

Resistencia a la cizalladura

La resistencia a la cizalladura de un adhesivo estructural no es más que el esfuerzo de cizalladura máximo en este precedentemente a la fractura bajo carga de torsión. La cizalladura es una tensión ejercida tangencialmente respecto del adhesivo, y que hace que los sustratos se solapen entre sí. También en este caso, la fuerza se ejerce en plano y se distribuye por toda la superficie de la línea de unión. (ASTM E-229)

Dureza

Cualidad de la capa superficial del material para resistir toda deformación plástica, elástica, o destrucción por la acción de esfuerzos de contacto locales originados por otro cuerpo (indentador o penetrador), con mayor dureza, de definida forma y dimensiones, el cual no sufre deformaciones residuales durante el contacto. (Beros, 2006)

Mojabilidad

Característica que posee un líquido de extenderse y dejar un esbozo sobre un sólido. Depende de las interacciones intermoleculares entre las moléculas superficiales de ambas sustancias. Se puede establecer a partir del ángulo que el líquido hace en la superficie de contacto con el sólido, llamado ángulo de contacto; a menor ángulo de contacto, mayor mojabilidad. (García, 2010)

Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es una medida de un líquido para humedecer la superficie de un sólido. Toma una forma de gota sobre una superficie y dependerá de la tensión superficial del fluido y la naturaleza de la superficie.

- Si el líquido corre uniformemente existe una humectación completa con un ángulo de contacto de 0°.
- Si el ángulo está entre 0° y 90°, la superficie es humectable.
- Si el ángulo está entre 90° y 180° la superficie se llama hidrofílica significa que la superficie no es humectable.
- Si el ángulo se aproxima claramente al valor de 180° Es hidrofóbico.
- Es una superficie ultra hidrofóbica si repele completamente a los líquidos

Pegajosidad

La pegajosidad define la cualidad de una superficie adherente para deformarse, fluir y humedecer otra superficie desde el instante en que entra en contacto con ella, dando lugar a una unión. “Agarre” es un término subjetivo para valorar la pegajosidad. (ASTM-D3121, 1994)

2.4. Marco legal

2.4.1.ASTM A 956 - 002

Standard test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products

Alcance

Método de prueba que apunta a la determinación de la dureza Leeb del acero fundido, acero y hierro fundido (Parte A) e incluyendo los métodos de verificación, de instrumentos de prueba de dureza Leeb (Parte B) y la evaluación de bloques de prueba ajustados (Parte C). (ASTM-A956, 2002)

Importancia y uso de la prueba

La prueba de dureza de un material puede tener varias connotaciones dependiendo del tipo y los objetivos de la prueba realizada. El principio de dureza Leeb está basado en el método (de rebote) dinámico, cuando un cuerpo de impacto con una punta de prueba de metal duro es propulsado mediante fuerza de resorte contra la superficie de la pieza de

ensayo. La pérdida de energía es detectada por medio de la comparación de las velocidades de impacto (v_i) y de rebote (v_r), cuando el cuerpo de impacto está a una distancia exacta de la superficie tanto para la etapa de impacto como para la etapa de rebote del ensayo. (ASTM-A956, 2002)

Equipo

El instrumento de prueba para la dureza Leeb, se basa en un dispositivo de impacto equipado con una bola de carburo de tungsteno o con punta de diamante sintético, un conjunto de medición de velocidad de bobina de inducción y un dispositivo indicador de dureza de pantalla digital (ver Figura 2-11). (ASTM-A956, 2002)



Figura 2-11: Dispositivo de impacto D.

Fuente: (ASTM-A956, 2002)

Pieza de prueba

El espesor y el peso de la probeta se deben considerar al seleccionar el dispositivo de impacto para ser empleado. También se deben tener en cuenta las indicaciones de la presente norma en aspectos de la probeta como: curvatura, acabado, campo magnético, vibración y temperatura. (ASTM-A956, 2002)

Procedimiento

La prueba de dureza se realiza usando un equipo de impacto, el cual debe estar conectado a un dispositivo indicador, antes de que el equipo de prueba entre en contacto con la superficie a verificar, se debe sujetar firmemente con una mano y posteriormente presionar el tubo de carga con la otra mano, hasta que se sienta el contacto con la superficie de prueba; luego se deja que el tubo de carga vuelva lentamente a la posición inicial. El cuerpo de impacto ahora está en su posición cargada o bloqueada. Para iniciar la prueba de impacto se ejerce una ligera presión sobre el botón de liberación y el valor de dureza Leeb se mostrará en el dispositivo indicador. (ASTM-A956, 2002)

Cálculo del resultado de dureza

El resultado de la prueba de dureza debe ser el promedio aritmético de las cinco lecturas de impacto individuales en el área de medición. (ASTM-A956, 2002)

2.4.2. ASTM D1002 - 99

Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)

Alcance

Este método de prueba cubre la determinación de la aparente resistencia al cizallamiento de adhesivos para unir metales cuando se prueban en una muestra estándar de junta de solapamiento y en condiciones específicas de preparación y ensayo. (ASTM-D1002, 1999)

Importancia y uso de la prueba

Este método de prueba es principalmente comparativo. Sin embargo, tiene aplicación como discriminador para determinar variaciones en parámetros de preparación de superficies adherentes y durabilidad ambiental del adhesivo. El método de prueba ha encontrado aplicaciones en controlar las preparaciones de superficies, los sistemas de imprimación y adhesivos para determinar las propiedades de resistencia de los sistemas probados. (ASTM-D1002, 1999)

Equipo

La máquina de ensayo debe seleccionarse de modo que la carga de rotura de las muestras cae entre el 15 y el 85 por ciento de la capacidad total. La máquina debe ser capaz de mantener una tasa de carga de 80 a 100 kg/cm²/min (1200 a 1400 psi /min), o, si la tasa depende del movimiento del cabezal, la máquina debe ajustarse para que se aproxime a esta velocidad de desplazamiento, aproximadamente 0,05 pulg/min. Deberá estar provisto de un par de empuñaduras autoalineables para sujetar la muestra. Se recomienda que las mordazas de estos agarres se acoplen a los 25 mm (1 pulg.) que corresponden al tamaño de la muestra de prueba. Las mordazas y accesorios deben estar contruidos de manera que se muevan en alineación con la muestra de ensayo tan pronto como se aplica la carga, de modo que el eje largo de la muestra de ensayo coincida con la dirección del tirón aplicado a través del centro línea del conjunto de agarre. La longitud de superposición de la muestra se puede variar cuando sea necesario. La longitud del espécimen en las mandíbulas, sin embargo, no debe modificarse. La distancia desde el final de la vuelta hasta el final de las mordazas debe ser de 63 mm (2 1/2 pulg.) en todas las pruebas. (ASTM-D1002, 1999)

Muestras de ensayo

Las muestras de ensayo deben ajustarse a la forma y dimensiones mostradas en la figura 2-10. Estas deben cortarse de paneles de ensayo preparados. El grosor recomendado de las láminas es 1,62 ± 0,125 mm (0,064 ± 0,005 pulg.). La longitud de superposición para la mayoría de los metales de 1,62 mm (0,064 pulg.) de espesor es de 12,7 ± 0,25 mm (0,5 ± 0,01 pulg.). Dado que no es deseable exceder el límite elástico del metal en tensión durante la prueba, la longitud permisible de superposición en la muestra variará con el grosor y el tipo de metal, y con el nivel general de resistencia del adhesivo que se está investigando. La longitud máxima permitida se puede calcular a partir de la siguiente relación:

$$L = F_{ty} \cdot t / \tau \quad (2.1)$$

L = Longitud de superposición

F_{ty} = Punto de fluencia del metal

t = Espesor del metal

τ = Esfuerzo de cizallamiento promedio

Una variación en el espesor del metal y la longitud de superposición probablemente influirá en los valores de prueba. Por esta razón, en pruebas comparativas o de especificación, el espesor debe ser preferiblemente $1,62 \pm 0,125$ mm ($0,064 \pm 0,005$ pulg.) y la longitud de superposición debe ser preferiblemente de $12,7 \pm 0,25$ mm ($0,5 \pm 0,01$ pulg.), o no exceder del valor calculado. Para las pruebas de desarrollo, los valores pueden ser diferentes, pero luego deben ser constantes. (ASTM-D1002, 1999)

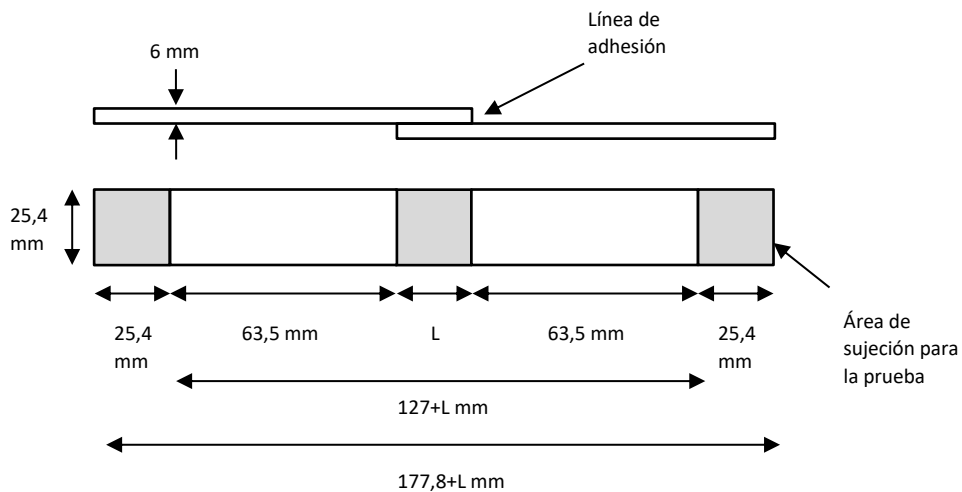


Figura 2-10: Forma y dimensiones de la probeta de ensayo.

Fuente: (ASTM-D1002, 1999)

Procedimiento

Ubique las muestras en la máquina de prueba de modo que los 25 mm (1 pulg.) exteriores de cada extremo estén en contacto con las mordazas y de modo que el eje largo de la muestra de ensayo coincida con la dirección de tracción aplicada a través de la línea central del conjunto de agarre. Ejercza la carga a la muestra a una tasa de 80 a 100 kg/cm²/min (1200 a 1400 psi/min). por min. Siga ejerciendo la carga hasta la falla. Esta tasa de carga se aproximará a una velocidad libre del cabezal de 1,3 mm (0,05pulg.) / min. (ASTM-D1002, 1999)

Cálculos

Tome lectura de la carga en el momento de la falla, la naturaleza y cantidad de esta falla (cohesión en adhesivo o metal, o adherencia) para cada muestra. Mida todas las cargas de falla en kilogramos por centímetro cuadrado (libras por pulgada cuadrada) de área de corte, calculado al más cercano a $0,06 \text{ cm}^2$ ($0,01 \text{ pulg}^2$). (ASTM-D1002, 1999)

2.4.3. ASTM D 3121 - 94

Standard Test Method for Tack of Pressure-Sensitive Adhesives by Rolling Ball

Alcance

Este método de prueba cubre la medición de la comparación de adhesivos sensibles a la presión mediante una bola rodante y es más apropiado para adhesivos de baja adherencia. Este método de prueba es solo uno de varios disponibles para la medición de la pegajosidad. (ASTM-D3121, 1994)

Importancia y uso de la prueba

La prueba de adherencia con bola rodante es rápida, fácil de ejecutar y requiere poca inversión en equipos y poca formación de operadores. Esta prueba está diseñada principalmente para uso de control de calidad, ya que demuestra buena reproducibilidad en un solo laboratorio y capacidad para detectar variaciones de lote a lote con precisión si el espesor de la película adhesiva se mantiene constante (ASTM-D3121, 1994).

Este es un método de prueba cualitativo en el cual se estima la adhesividad en función de la distancia que alcanza a recorrer la bola hasta que se detiene por causa de la película adhesiva.

Equipo

Alimentador inclinado equipado con una palanca de liberación en el tope a través del cual la pelota gana impulso cuesta abajo (ver figura 2-12). La bola es una bola de acero de 7/16 pulgadas. (11,1 mm). (ASTM-D3121, 1994)



Figura 2-12: Aparato de prueba de adhesión.

Fuente: (ASTM-D3121, 1994)

Muestra de ensayo

La muestra de ensayo es un sustrato recubierto con un adhesivo sensible. Por lo general, mide aproximadamente 51 mm (2 pulg.) de ancho y aproximadamente 15 pulg. (381 mm) de largo. Dimensión de muestra específica. (ASTM-D3121, 1994)

Procedimiento

Seleccione una superficie horizontal dura de tamaño suficiente para realizar la prueba. Antes de las pruebas de cada lote de adhesivo, limpie el inclinado a fondo con un disolvente adecuado. Disponga la muestra a ensayar, con el lado adhesivo hacia arriba. La muestra debe estar libre de cualquier arrugas, pliegues o empalmes. El extremo del espécimen opuesto a la pendiente se sujetará a la mesa con cinta o un peso. Solamente se ejecutará una prueba en cada muestra. Antes de cada rodada de la pelota, límpiela a fondo con un disolvente adecuado elegido para eliminar cualquier posible residuo de adhesivo. Limpie con un material absorbente blanqueado y sin pelusa para eliminar cualquier residuo restante. Después de limpiar, no toque la bola o pista de rodadura. Use tenazas limpias y secas para colocar la bola en el lado superior del comunicado. (ASTM-D3121, 1994)

2.4.4. ASTM D 3846 - 02

Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics

Alcance

Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia al corte en el plano de los plásticos termoendurecibles reforzados en forma de hoja en espesores que van desde 2,54 a 6,60 mm (0,100 a 0,260 pulg.). (ASTM-D3846, 2002)

Importancia y uso de la prueba

Las pruebas de cizallamiento de varios tipos se utilizan ampliamente en la industria de plásticos reforzados para evaluar la fuerza de la unión de refuerzo a resina en poliéster, vinil éster y compuestos de resina epoxi. Además de su importancia para la generación de datos para investigación y desarrollo, calidad para fines de control y especificación, tales pruebas son fundamentales para la industria del refuerzo fibroso, ya que pueden ser utilizadas para evaluar el potencial de nuevos sistemas de dimensionamiento para el tratamiento superficial de fibras de vidrio. (ASTM-D3846, 2002)

Equipo

Cualquier máquina de prueba adecuada capaz de controlar el movimiento del cabezal de velocidad constante y valorando esencialmente lo siguiente: mecanismo de transmisión, indicador de carga, herramienta de compresión, plantilla de soportes, micrómetros, y llave dinamométrica. (ASTM-D3846, 2002)

Muestra de ensayo

Las muestras de prueba deben ajustarse a la forma y dimensiones dadas en la figura 2-13. (ASTM-D3846, 2002)

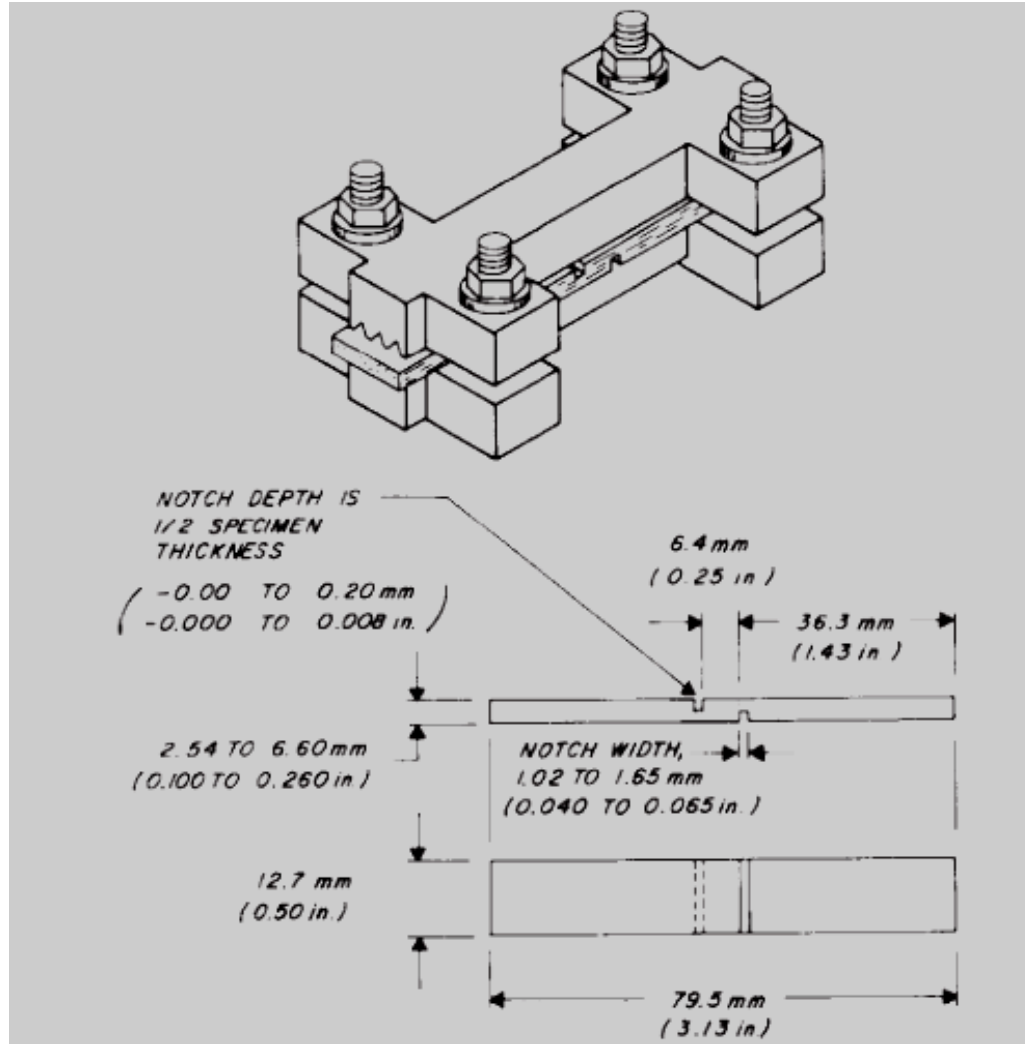


Figura 2-13: Muestra y plantilla de carga para prueba de cizallamiento en el plano.

Fuente: (ASTM-D3846, 2002)

Procedimiento

Mida el ancho de la muestra entre las muescas al 0,025 mm (0,001 pulg.) más cercano. Monte la muestra en la plantilla de soporte (Figura 2-13) de manera que esté alineado con la base y centrado. Apriete las tuercas de la plantilla con la llave dinamométrica a un par de $0,113 + 0,000, - 0,028 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($1,00 + 0,00, - 0,25 \text{ lbf} \cdot \text{pulg.}$). Establezca el control de velocidad en 1,3 mm / min (0,050 pulg./min) y encienda la máquina. Registre la carga máxima soportada por la muestra durante la prueba. (Por lo general, esta será la carga en el momento de ruptura.). Determine la longitud del área fallada (cortada) hasta el más

cercano a 0,025 mm (0,001 pulg.) mediante la medición de esta superficie con respecto a cualquier mitad de la muestra rota. (ASTM-D3846, 2002)

Cálculo

Calcule el esfuerzo cortante dividiendo la carga máxima soportada por la muestra durante el ensayo entre el producto del ancho del espécimen y la longitud del área fallada. (ASTM-D3846, 2002)

$$\tau_{plano} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_e L_F} \quad (2.2)$$

A_e = Ancho del espécimen

$F_{m\acute{a}x}$ = Carga cortante máxima

L_F = Longitud del área fallada

τ_{plano} = Esfuerzo cortante en el plano

Capítulo 3 Metodología

Para la realización del proyecto se tiene en cuenta los dos tipos de metodología: cuantitativa y cualitativa; pues los parámetros incluidos son medibles, cuantificables y caracterizables.

3.1. Tipo de investigación

El desarrollo de este estudio se lleva a cabo desde tres ejes investigativos: experimental, pues se realizan muestras de laboratorio; operativa, ya que se analiza la muestra fabricada (probeta) de EPS permitiendo examinar las propiedades mecánicas del adhesivo a fabricar; y científica, porque se hace el estudio previo de los parámetros, características y comportamiento del material objeto de estudio, de los reactivos a emplear y alternativas de reciclaje para el poliestireno expandido.

3.2. Población y muestra

Para realizar el estudio se efectuó un sondeo de las empresas de reciclaje constituidas actualmente en Colombia previo a una revisión de la literatura que proporciona tales datos, eso con el fin de medir la cantidad de residuos sólidos que produce la población colombiana pero que son debidamente reciclados.

Se estableció un estudio experimental de laboratorio, elaborando tres muestras con diferentes proporciones de acetona/acetato de etilo y llevando a cabo distintas repeticiones para determinar propiedades mecánicas. Las proporciones fueron definidas a priori para luego comprobar con experimentos preliminares si los resultados eran válidos y adecuados.

3.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de información

La información analizada para el desarrollo del proyecto se extrae de manera cuantificada y cualificada mediante la observación del estado final de la muestra del material reciclado (EPS), análisis de información recolectada mediante las empresas encargadas de los residuos sólidos de la población colombiana, recolección de antecedentes de artículos, proyectos, documentación e investigaciones realizadas acerca del tema de estudio, y caracterización mecánica de las propiedades de tensión, pegajosidad y cizalladura del material adhesivo obtenido.

3.4. Análisis de información

La recolección de información de libros, sitios web, artículos de revistas científicas, monografías, tesis, entre otros, y de los datos obtenidos se analizan siguiendo una serie de pasos determinados y estos son: identificación de las necesidades en información y datos del tema de estudio, selección de información relevante y datos válidos, determinación de la información relevante y datos ajustados a la realidad del estudio, interpretación de todo el contenido de la investigación.

3.5. Actividades, fases o etapas en la investigación

3.5.1. Fase I

Caracterizar las propiedades mecánicas del residuo de poliestireno expandido (EPS), al ser disuelto empleando diferentes composiciones de acetona-acetato de etilo.

Actividad 1

Examinar las propiedades físicas y químicas del EPS mediante la revisión de la literatura para caracterizar del material.

Actividad 2

Analizar los factores más relevantes en el proceso de degradación del EPS para el proceso de reciclaje químico.

Actividad 3

Establecer las propiedades mecánicas, de interés para la investigación, del EPS.

3.5.2. Fase II

Establecer la proporción acetona-acetato de etilo mediante muestras de laboratorio que permita obtener propiedades mecánicas de un adhesivo asfáltico a obtenidos a partir de EPS.

Actividad 1

Estudiar los componentes de acetona-acetato de etilo mediante revisión de la literatura.

Actividad 2

Dosificar las muestras utilizando variaciones en las proporciones de acetona/acetato de etilo.

Actividad 3

Valorar y caracterizar las muestras para los ensayos de laboratorio.

3.5.3. Fase III

Caracterizar mecánicamente muestras de laboratorio obtenidas mediante diferentes mezclas de solventes para establecer cuál es la que presenta las mejores propiedades para un adhesivo asfáltico.

Actividad 1

Realizar las pruebas de tensión, pegajosidad, cizalladura y dureza con el material adhesivo de EPS.

Actividad 2

Evaluar las propiedades mecánicas mediante las fuerzas, esfuerzos y la desviación estándar analizados en los ensayos mecánicos seleccionar cuál muestra permite mejores resultados.

Actividad 3

Efectuar una comparación entre el adhesivo asfáltico estudiado y un adhesivo tomado de la literatura.

Capítulo 4 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las actividades propuestas que estructuran el procedimiento metodológico que se llevó a cabo para el desarrollo del proyecto.

4.1. Caracterizar las propiedades mecánicas del residuo de poliestireno expandido (EPS), al ser disuelto empleando diferentes composiciones de acetona-acetato de etilo

4.1.1. Examinar las propiedades físicas y químicas del EPS mediante la revisión de la literatura para caracterizar el material

Una indagación detallada en diversos artículos de revistas científicas, textos académicos, sitios web y otras referencias bibliográficas llevó a estructurar el siguiente contenido, utilizado como base para caracterizar el poliestireno expandido (examinando las propiedades que este presenta). En el marco teórico está contenida información relacionada con esta actividad (ver capítulo 2). El resultado de esta actividad se muestra a continuación.

Propiedades mecánicas

El hecho de que la estructura molecular del poliestireno expandido cerque aire le permite absorber la energía de un impacto y retornar a su forma original luego de deformarse. En la Tabla 4-1 se pueden ver las propiedades mecánicas de relevancia para diferentes grados de poliestireno. El poliestireno expandido es usado como un buen material de amortiguación, sus cualidades mecánicas se ven favorecidas por el acrecentamiento de la densidad del polímero, esta asimilación se puede apreciar en la Tabla 4-2. (Saltos Barreiro, 2015)

Tabla 4-1: Propiedades mecánicas.

Propiedades	Método de ensayo	Grado del poliestireno			
		Uso general	Alto peso molecular	Resistente al calor	Alta fluidez
Fuerza a la tracción (MPa)	ASTM D638	40 - 48	45 - 52	45 - 52	40 - 48
Elongación (%)	ASTM D638	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5	1,0 – 2,5
Módulo en tensión (MPa)	ASTM D638	35	35	38	35
Fuerza a la flexión (MPa)	ASTM D790	62 - 76	69 - 83	76 - 97	62 - 76
Resistencia al impacto (kJ/m ² <i>notched Izod</i>)	BSI493	1,31 – 1,84	1,31 – 1,84	1,31 – 1,84	1,31 – 1,84

Fuente: (Saltos Barreiro, 2015)

Tabla 4-2: Propiedades físicas.

Densidad (kg/m ³)	15	25	40	50
Fuerza a la tensión (kPa)	200	350	600	750
Fuerza a la flexión (kPa)	200	400	700	900
Tensión al 10% de compresión (kPa)	90	180	320	400

Fuente: (Saltos Barreiro, 2015)

Las características físicas son afectadas por la geometría de celdas y densidad del polímero, aumentando su resistencia a la compresión, flexión y tensión si acrecienta su densidad. La resistencia al cizallamiento crece si se disminuye la temperatura a la que se somete el polímero. (Saltos Barreiro, 2015)

Propiedades químicas

La solubilidad del polímero en el solvente es dependiente de las fuerzas intermoleculares. Si la interacción entre moléculas es semejante o mayor a la interacción se originará la disolución, caso contrario solo las moléculas similares se unirán. (Saltos Barreiro, 2015)

Para conocer la capacidad de los solventes para diluir un polímero, se establece la contribución de la fuerza intermolecular usando los parámetros δ_v (parámetro de solubilidad) y δ_h (puentes de hidrogeno), Figura 4-14. (Saltos Barreiro, 2015)

$$\delta_v = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2} \quad (4.1)$$

δ_v = Parámetro de solubilidad

δ_d = Fuerzas de dispersión

δ_h = Puentes de hidrogeno

δ_p = Fuerzas dipolares

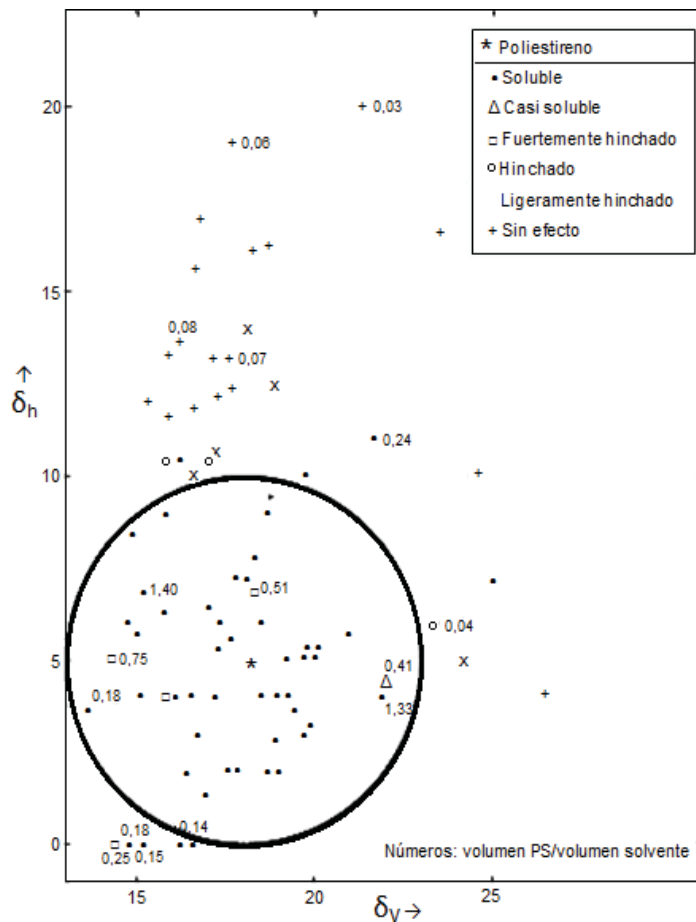


Figura 4-1: Solubilidad del poliestireno en varios solventes.

Fuente: (Saltos Barreiro, 2015)

Las fuerzas dipolares y dispersión que calculan el parámetro de los puentes de hidrógeno δ_h y solubilidad δ_v , se encuentran tabulados según el solvente. (Saltos Barreiro, 2015).

El poliestireno es disuelto por hidrocarburos con parámetros de solubilidad semejantes, como el tolueno, benceno y etilbenceno, por hidrocarburos clorados como el tetracloruro de carbono, cloroformo y o- diclorobenceno, por algunas cetonas. (Saltos Barreiro, 2015).

4.1.2. Analizar los factores de disolución del EPS para el proceso de reciclaje químico.

El reciclaje químico es la solubilidad del material en diferentes solventes de acuerdo a su característica de polaridad usando un solvente con la misma característica. El poliestireno es un compuesto no polar, con lo cual se debe usar un solvente no polar para llegar a formar soluciones, dando buenas características y llegando a soluciones saturadas, para garantizar la solubilidad total del material. (Quintero Peña, 2013)

Por lo anterior, se puede afirmar que para disolver el poliestireno expandido usando solventes (reciclaje químico) se deben tener en cuenta las características de los mismos para asegurar la solubilidad del EPS en estos, estableciendo compatibilidad química entre sí. Esto se detalla de forma clara en el apartado donde se describen las propiedades químicas del poliestireno expandido.

4.1.3. Establecer las propiedades mecánicas, de interés para la investigación, del EPS.

Con base en el marco teórico elaborado a partir de la revisión bibliográfica del tema de estudio, se concluye que debido a las propiedades del poliestireno expandido es un material potencial y abundante que puede ser utilizado para la fabricación de adhesivos. Se establecen las siguientes propiedades mecánicas con fines de ensayos:

Tracción: Determinación del esfuerzo cortante bajo la Norma ASTM D 1002.

Cizalladura: Determinación de la deformación lateral (deformación paralela al plano de unión) que se produce por una fuerza externa bajo la ASTM D 3846.

Dureza: Determinación de la resistencia del material a sufrir penetración o ralladura por otro material, bajo norma ASTM A 956.

Pegajosidad: Consiste en dejar rodar un balón de 10,1 mm sobre una rampa estándar (canal de la rampa en ángulos de 45°) con pendiente de 21,5° y 137 mm de longitud horizontal de la rampa; donde inicia el contacto con una mezcla homogénea determinando una distancia de frenado del balón de acuerdo con la norma ASTM D 3121.

4.2. Establecer la proporción acetona-acetato de etilo mediante muestras de laboratorio que permita obtener propiedades mecánicas adecuadas para la elaboración de adhesivo asfáltico a partir de EPS

4.2.1. Estudiar los disolventes acetona-acetato de etilo mediante revisión de la literatura

Se seleccionaron, entre los distintos solventes posibles, para la disolución del poliestireno expandido acetona y acetato de etilo teniendo en cuenta la compatibilidad química y la buena capacidad de disolver de estos compuestos al EPS reciclado, todo justificado en base a lo expuesto en las presentes actividades. Estos disolventes se utilizan de forma mezclada a diferentes proporciones. A continuación, se presenta una síntesis de lo concerniente a estos disolventes.

Acetato de etilo

Disolvente utilizado en la industria, producido por una reacción de condensación de ácido acético y etanol (ver Figura 4-2). Gracias a la irrupción de la química verde en la industria, se implementa nuevos métodos como transformación de residuo industrial o transesterificación del acetato de metilo, rutas sin la utilización de ácido acético, para una producción de forma más limpia de acuerdo con los principios de esta química verde (González Montiel, 2015).

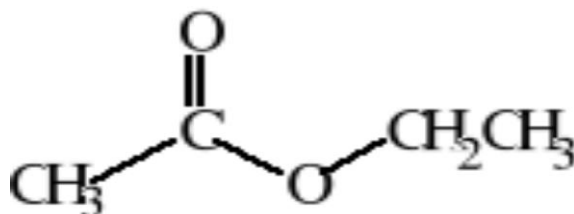


Figura 4-2: Estructura del acetato de etilo.

Fuente: (González Montiel, 2015)

Acetona

La acetona es una sustancia química (ver Figura 4-3) que se encuentra de forma natural en el medio ambiente. Es un líquido incoloro con un olor dulce similar al de las frutas y un sabor característico. Se evapora fácilmente, es inflamable y muy soluble tanto en agua como en solventes orgánicos, tales como el éter, metanol, y etanol. (Quiroz Valiente & Solano mateo, 2014)

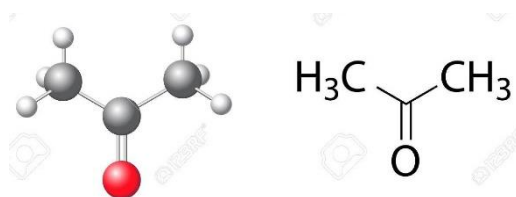


Figura 4-3: Formula química estructural de la acetona.

Fuente: (Quiroz Valiente & Solano mateo, 2014)

Aplicaciones

La Acetona es utilizada principalmente por los laboratorios, para la fabricación de metil metacrilato, ácido metacrílico, metacrilatos y bisfenol A, entre otros. Asimismo, es utilizado como base para diluyentes de lacas, pinturas, tintas, y para la cristalización y el lavado de fármacos.

4.2.2. Dosificar las muestras utilizando variaciones en las proporciones de acetona/acetato de etilo.

Arriola & Velásquez afirman que “el factor disolvente es un factor variable y controlable, se toman diferentes mezclas y concentraciones de disolventes orgánicos al cual se le agrega

EPS a diferentes concentraciones para determinar cuál de las mezclas es más efectiva para determinar la mejor viscosidad”.

Para efectos de ensayos preliminares, y basado en la referencia anteriormente enunciada se realizó a priori una variación de mezclas según la Tabla 4-3, las cuáles se evaluaron determinando como característica principal la pegajosidad de la mezcla. Se emplea un código distintivo (propuesto en la tabla 4-3) para la designación de las mezclas de solventes.

Tabla 4-3: Designación de las distintas mezclas de solventes.

Acetona (% vol.)	Acetato de etilo (% vol.)	Designación
20	80	RS2080
50	50	RS5050
80	20	RS8020

Fuente: Elaborada por autor.

Como se observa en la tabla anterior, la designación de las mezclas consta de dos letras en mayúsculas para denotar la muestra seguido del porcentaje de acetona y luego el porcentaje de acetato de etilo.

La mezcla de poliestireno expandido, obtenido de platos desechables limpios y el solvente con las diferentes proporciones de los compuestos se estableció en: 3 gramos de EPS y 5 cc del solvente acetona/acetato de etilo.

4.2.3. Valorar y caracterizar las muestras para los ensayos de laboratorio.

Se definió un diseño de experimentos elaborando las muestras de ensayo (probeta) respectivas para cada una de las mezclas a diferente proporción, se realizan las repeticiones necesarias, ajustados a las normas para los respectivos ensayos y que están descritas en el documento (ver Capítulo 2, Marco legal), a cada composición (mezcla acetona/acetato de etilo); igualmente el número de repeticiones para cada ensayo asegura el obtener una validez en los resultados. Se puede afirmar, y sustentados en las normas que contiene el documento, que para algunos casos el número de repeticiones, por ejemplo, tiene un límite mínimo (ver capítulo 2, marco legal) el cual se debe cumplir, por encima del valor sugerido se pueden efectuar las repeticiones que el investigador así considere convenientes.

Todas las muestras se realizaron con una base de asfalto pues el objetivo de la investigación es caracterizar un adhesivo a base de poliestireno expandido, pero de tipo asfáltico, las características generales de las muestras (dimensiones, forma, acabado, etc.) están ajustadas en las normas definidas en el marco referencial del presente informe (para una información detallada ver capítulo 2, marco legal).

Las pruebas se llevaron a cabo por triplicado, y por medio de una máquina universal de ensayos con objeto de caracterizar y clasificar el adhesivo obtenido en elástico o rígido de acuerdo a la elongación o resistencia a la fractura que presente. Los procedimientos, equipo, y demás apartes de las diferentes pruebas están debidamente especificadas en el marco legal.

4.3. Caracterizar mecánicamente muestras de laboratorio obtenidas mediante diferentes mezclas de solventes para establecer cuál es la que presenta las mejores propiedades para un adhesivo asfáltico.

4.3.1. Realizar las pruebas de tensión, pegajosidad, cizalladura y dureza para el material adhesivo de EPS.

Las pruebas de tensión, pegajosidad, cizalladura y dureza para el material adhesivo de EPS se llevaron a cabo estrictamente como se describió en los diferentes capítulos del documento, el resultado de esta actividad se presenta a continuación.

En la figura 4-4 se puede observar la mezcla de EPS y solvente RS2080 en el vaso de precipitado en el momento de ser agregado el poliestireno expandido con el fin de disolverlo para que se forme la mezcla adhesiva y utilizarla en las diferentes pruebas para determinar las diferentes propiedades mecánicas. El proceso de disolución para las otras dos proporciones de solvente fue el mismo.

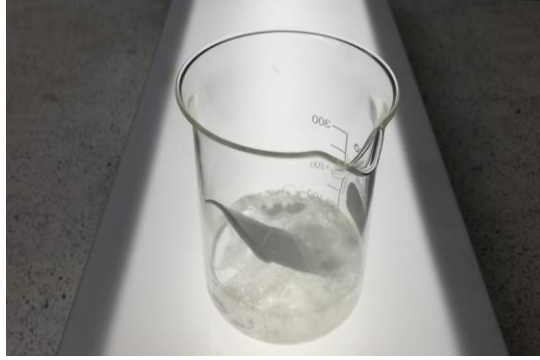


Figura 4-4: Disolución del EPS en la mezcla acetona/acetato de etilo.

Fuente: Autor del proyecto

En la Figura 4-5 se presentan las herramientas que se emplearon para realizar la prueba de pegajosidad, en donde se observa la presencia del balín de prueba, el cual se dejó deslizar por la rampa estándar con objeto de evaluar la distancia recorrida sobre la superficie con el adhesivo.



Figura 4-5: Montaje para la prueba de pegajosidad.

Fuente: Autor del proyecto

Para estos ensayos se realizó una adaptación de la prueba sugerida en la norma ASTM D1002, la cual fue concebida para evaluar un adhesivo aplicado sobre dos láminas metálicas, para este caso, se substituyó una de las láminas metálicas por un fragmento de asfalto, a fin de evaluar el desempeño del adhesivo en este tipo de material. Las probetas se fabricaron empleando una lámina de aluminio adherido a un bloque de asfalto manteniendo un área de contacto de 1 pulg² de acuerdo con lo recomendado por la norma.

En la figura 4-6 se evidencia el respectivo montaje para la prueba de cortante. La probeta se encuentra sujeta ya al equipo para iniciar el ensayo de laboratorio.



Figura 4-6: Montaje para la prueba de cortante.

Fuente: Autor del proyecto

Las muestras fueron preparadas y se dejaron secar por un periodo superior a una semana, posteriormente se enviaron a un laboratorio donde se realizaron las pruebas mecánicas de acuerdo con las indicaciones sugeridas por las respectivas normas internacionales. Para la ejecución de las pruebas se debió elaborar un montaje especial, debido a que las muestras de asfalto empleadas no se podían sujetar directamente por las mordazas de la máquina universal de ensayos. Para este estudio, no se consideró el efecto del tiempo de secado del adhesivo sobre las propiedades mecánicas

En la figura 4-7 muestra el montaje realizado para la prueba de tensión previo al inicio de la misma ajustados al procedimiento descrito en la norma. Para fabricar las probetas se pegó de manera uniforme un elemento de metal con una base de asfalto.



Figura 4-7: Montaje para la prueba de tensión.

Fuente: Autor del proyecto

4.3.2. Evaluar las propiedades mecánicas mediante las fuerzas, esfuerzos y la desviación estándar analizados en los ensayos mecánicos para seleccionar cuál muestra permite mejores resultados.

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran a continuación en las diferentes tablas y gráficos presentados, el análisis de cada prueba se enuncia inicialmente.

Prueba de dureza

Las pruebas de dureza son fundamentales en la caracterización de los materiales; sin embargo, en nuestro caso no ha sido posible establecer valores reales de esta prueba. En la figura 4-8 se pueden observar las burbujas formadas en la probeta de ensayo que alteran de manera significativa los resultados.

Se intentó hacer probetas sólidas con un espesor aproximado de 5 mm, sin embargo, una vez la mezcla asfáltica en prueba iniciaba el secado, esta presentaba múltiples burbujas de gran tamaño (ver imagen 4-8), motivo por el cual al aplicar las indentaciones con el

durómetro la muestra se deformaba plásticamente falseando los resultados de la prueba de dureza.

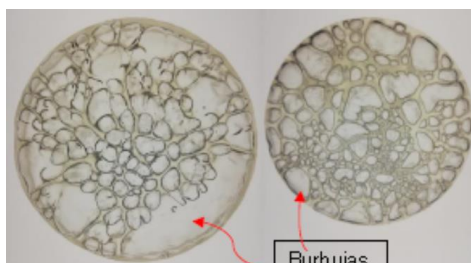


Figura 4-8: Huella de indentación de la prueba de dureza.

Fuente: Autor del proyecto

Prueba de tensión

Para la prueba de tensión se pegó de manera uniforme un elemento de metal con una base de asfalto el cual fue sometida a pruebas de tensión por una maquina universal con capacidad de 250 KN. De la tabla 4-5 y de la figura 4-10 se pudo deducir fácilmente que la mezcla RS8020 (80% acetona y 20% acetato de etilo) proporciona mayor rigidez y resistencia al esfuerzo de tensión. La mezcla RS8020 resiste un esfuerzo máximo promedio a la tensión de exactamente 266 kPa, una cifra que es 1,5 y 0,3 veces mayor a las de las mezclas RS5050 y RS2080 respectivamente. En síntesis, al aumentar el porcentaje de acetona en la mezcla de solvente se obtienen mayores resistencias a la tensión.

La tabla 4-4 y la figura 4-9 muestran los resultados de las pruebas de tensión, pero referente a la fuerza máxima soportada.

Tabla 4-4: Resultados de la prueba de tensión (Fuerza máxima).

Mezcla de solventes	Fuerza máxima (N)			Fuerza máxima promedio (N)	Desviación estándar (N)
	S1	S2	S3		
RS2080	51	72	104	76	27 (22%)
RS5050	24	35	59	39	18 (15%)
RS8020	109	87	102	99	11 (9%)

Fuente: Elaborada por autor.

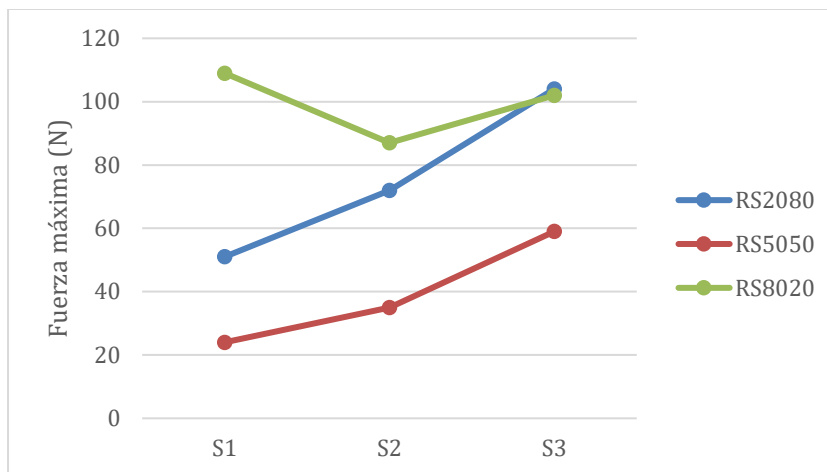


Figura 4-9: Grafico de fuerza máxima (resultados prueba de tensión).

Fuente: Autor del proyecto.

Tabla 4-5: Resultados de la prueba de tensión (Esfuerzo máximo).

Mezcla de solventes	Esfuerzo máximo promedio (kPa)			Esfuerzo máximo promedio (kPa)	Desviación estándar (kPa)
	S1	S2	S3		
RS2080	136	189	273	199	69 (56%)
RS5050	75	92	157	108	43 (35%)
RS8020	289	239	269	266	25 (21%)

Fuente: Elaborado por autor.

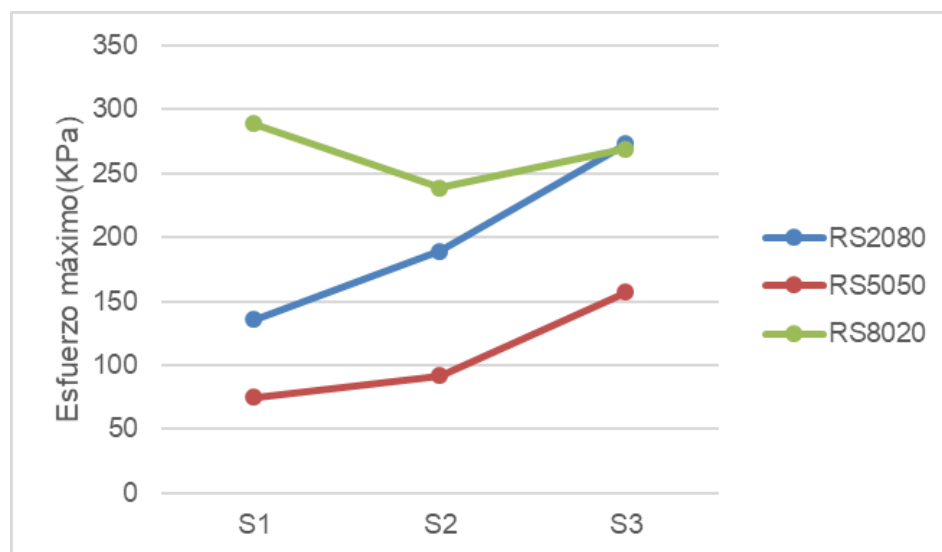


Figura 4-10: Grafico de esfuerzo máximo (resultados prueba de tensión).

Fuente: Autor del proyecto.

Pegajosidad

De la tabla 4-6 y de la figura 4-11 se puede deducir fácilmente que la mezcla RS8020 (80% acetona y 20% acetato de etilo) proporciona menor pegajosidad y resistencia al deslizamiento del balín de prueba pues la distancia promedio de rodadura (distancia recorrida del balín antes de detenerse) es mayor.

La mezcla RS8020 permite una distancia de rodadura promedio de 473,5 mm, una cifra en torno al doble que el obtenido las mezclas RS5050 y RS2080. En síntesis, al aumentar el porcentaje de acetona en la mezcla de solvente se obtiene una menor pegajosidad del adhesivo.

Tabla 4-6. Resultados de la prueba de pegajosidad.

Mezcla de solventes	Distancia de rodadura (mm)		Promedio de la distancia de rodadura (mm)	Desviación estándar (mm)
	S1	S2		
RS8020	465	482	473,5	8,5 (2%)
RS5050	220	294	257	33,68 (13%)
RS2080	170	225	197,5	27,5 (14%)

Fuente: Elaborada por el autor del proyecto.

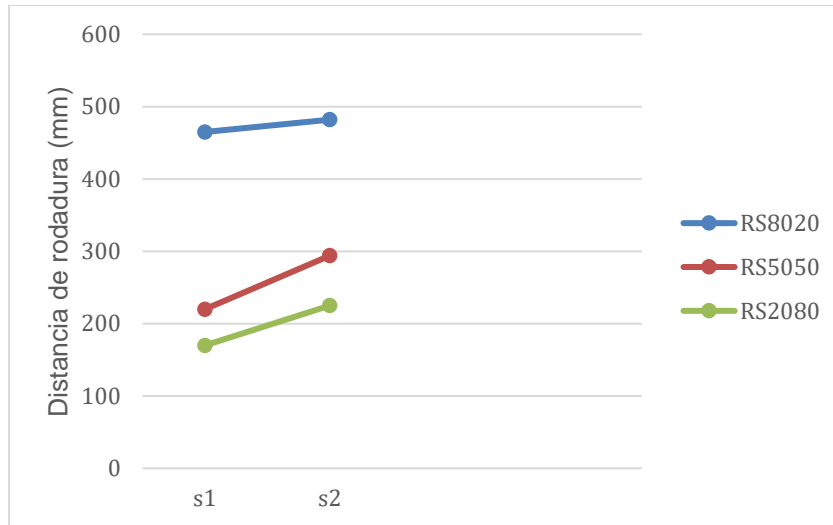


Figura 4-11: Grafico de resultados de la prueba de pegajosidad.

Fuente: Autor del proyecto.

Cizalladura

Se presenta el mismo comportamiento de la prueba de tensión. De la tabla 4-7 y de la figura 4-12 se puede deducir fácilmente que la mezcla RS8020 (80% acetona y 20% acetato de etilo) proporciona mayor resistencia a la cizalladura (resistencia al esfuerzo cortante ejercido por una fuerza paralela al plano de la superficie de adherencia).

La mezcla RS8020 resiste un esfuerzo cortante máximo promedio de aproximadamente 271,97 kPa, una cifra que es significativamente mayor a las de las mezclas RS5050 y RS2080. En síntesis, al aumentar el porcentaje de acetona en la mezcla de solvente se obtiene una mayor resistencia a la cizalladura.

Tabla 4-7: Resultados de la prueba de resistencia a la cizalladura.

Mezcla de solventes	Esfuerzo Máximo (kPa)			Esfuerzo máximo promedio (kPa)	Desviación Estándar (kPa)
	S1	S2	S3		
RS2080	84,05	242,98	244,96	190,66	92,34
RS5050	220,44	315,93	242,04	259,47	50,07
RS8020	206,88	408,82	200,2	271,97	118,56

Fuente: Autor del proyecto.

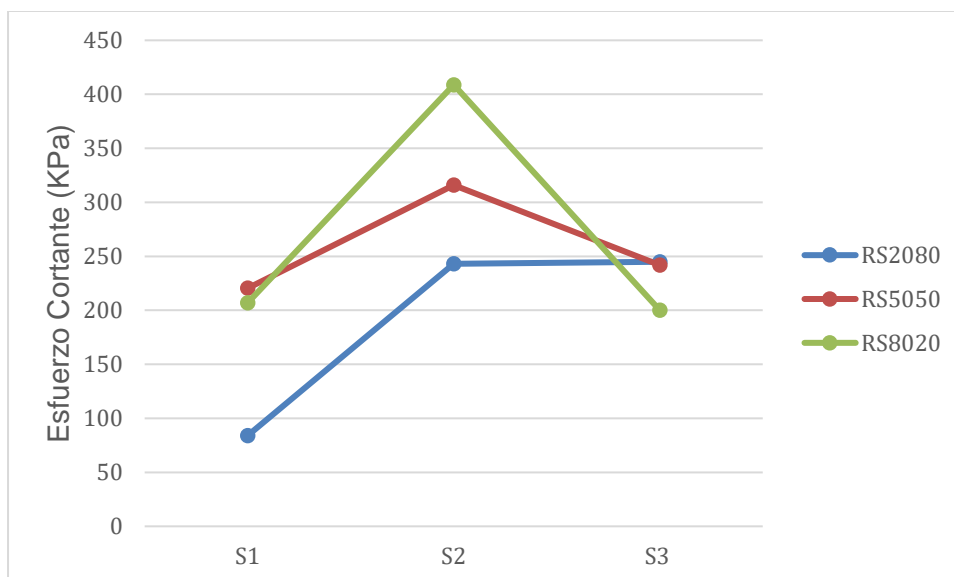


Figura 4-12: Grafico del esfuerzo máximo cortante (Prueba de resistencia a la cizalladura).

Fuente: Autor del proyecto.

Análisis general

El análisis de las diferentes pruebas permite enunciar lo siguiente: si se desea fabricar un adhesivo a base de poliestireno expandido de mayor pegajosidad se debe disolver el EPS en una muestra de bajo contenido de acetona y alta en acetato de etilo (RS2080), para el caso que el adhesivo a fabricar se quiera utilizar para uniones con esfuerzos elevados el poliestireno expandido se debe disolver en una mezcla con una proporción de acetona elevada en comparación con la de acetato de etilo (RS8020).

4.3.3. Efectuar una comparación entre el adhesivo asfáltico estudiado y un adhesivo tomado de la literatura.

Para efectos de comparación se tomó un adhesivo de los antecedentes expuestos en el capítulo 2 del presente documento del proyecto titulado “Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)” por Enma Aracely Arriola. Para realizar este adhesivo el autor utilizó butil acetato al 100% como disolvente. Se describen tres propiedades del mismo para tener a consideración: resistencia a la tensión, dureza y adherencia. En el proyecto mencionado el adhesivo descrito presenta baja dureza siendo del grado HB, respecto a la adherencia es relativamente buena y la resistencia a la tensión medida a 2 minutos de secado es exactamente 15,4 lbf/pulg² (106 kPa) aproximadamente.

En el presente estudio se han exhibido los resultados de un adhesivo a base de EPS que consiste en la disolución del EPS, obtenido de empaques desechables comerciales, en dos tipos de solventes: acetona y acetato de etilo. Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas muestran las propiedades de este residuo. Sin embargo, al comparar estas propiedades de resistencia mecánica obtenidos con los resultados reportados por otros investigadores. Se encontró que los valores de resistencia son inferiores a los reportados en la literatura, lo cual se debe principalmente a que en las pruebas realizadas se utilizaron fragmentos de asfalto, los cuales presentan una resistencia menor que las láminas metálicas que son empleadas normalmente en este tipo de evaluaciones. En este trabajo se buscó evaluar la capacidad adhesiva del EPS sobre muestras asfálticas. En los resultados se pudo observar que normalmente la falla se presenta en el sustrato asfáltico, es por esto que los resultados de resistencia obtenidos son inferiores a los reportados en la literatura para este tipo de adhesivos.

De acuerdo con las caracterizaciones realizadas, se encontró que:

- Cuanto mayor es el contenido de acetona en el solvente, mayor es la resistencia después del secado.
- Asimismo, a mayor contenido de acetona se presentará un secado más rápido en comparación con una mezcla de solventes con mayor contenido de acetato de etilo.
- Los adhesivos obtenidos por disolución de EPS con disolventes con mayor proporción de acetona tienen mayores resistencias mecánicas, pero a su vez, estos residuos tienen una mayor viscosidad y un secado más rápido, lo cual no es deseable en algunas aplicaciones.
- Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que los residuos de EPS son viables de ser reprocesados para ser usados en aplicaciones relacionadas con materiales de construcción.
- Investigaciones futuras permitirán dar un mejor uso a los residuos de EPS y posibilitarán un mejor aprovechamiento de los residuos poliméricos.

Conclusiones

Para disolver el poliestireno expandido usando disolventes (reciclaje químico) se deben tener en cuenta las características de los solventes a utilizar para asegurar la solubilidad del EPS en estos y haya una especie de compatibilidad química entre sí, las características químicas del poliestireno expandido indican que es soluble en compuestos de acetona/acetato de etilo lo que valida la utilización de estos para el reciclaje químico del poliestireno expandido. Debido a las propiedades del poliestireno expandido se concluye que es un material potencial y abundante que puede ser utilizado para la fabricación de adhesivos con buenas propiedades de pegajosidad, resistencia a la tensión y a la cizalladura, lo que da paso a una técnica de reciclaje viable para este material.

La acetona y el acetato de etilo son compuestos de excelentes propiedades y con múltiples aplicaciones, entre ellas la de actuar como solvente, siendo válida su elección para darles ese uso. Al ser el factor disolvente controlable y variable por el investigador, es suficiente haber establecido tres mezclas a diferentes proporciones acetona/acetato de etilo: 80/20, 50/50 y 20/80, en su respectivo orden.

Las pruebas realizadas de las distintas propiedades mecánicas al adhesivo fabricado de poliestireno por medio del reciclaje químico y utilizando mezclas de solventes a diferentes proporciones de acetona/acetato de etilo evidenciaron una variación de las propiedades de pegajosidad, resistencia a la tensión y a la cizalladura al variar la proporción de los compuestos en la mezcla de solvente. El comportamiento evidenciado es el siguiente: un aumento en la concentración de acetona en la mezcla de solvente produce una mayor resistencia a la tensión y a la cizalladura, y la disminución en la concentración de acetona genera una mayor pegajosidad.

El adhesivo estudiado presenta ventaja respecto al tomado de la literatura puesto que posee una mejor pegajosidad y una resistencia a la tensión más elevada siendo esta 1,5 veces mayor respecto al valor referenciado teniendo como criterio la mezcla más destacada en el análisis.

Recomendaciones para trabajos futuros

Estudiar más relaciones acetona/acetato de etilo u otros solventes con objeto de obtener un residuo que presente las mejores características mecánicas.

Evaluar otras propiedades mecánicas que permitan una caracterización más completa del adhesivo, como, por ejemplo, ensayos de desprendimiento y mojabilidad de las mezclas usadas.

Indagar sobre otros tipos de polímeros o tipos de poliestireno que puedan ser empleados en la fabricación de adhesivos.

Referencias bibliográficas

- Arcila Arcila, I. C., & Miranda Giraldo, J. (2016). Evaluación de la producción de pintura a partir de los residuos de Poliestireno expandido utilizando un solvente amigable con el ambiente (*Bachelor's thesis, Universidad EAFIT*).
- Arriola Lara, E. A., & Velásquez Martell, F. E. (2013). Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS). [Tesis de pregrado] Universidad de El Salvador. Disponible en [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/5033/1/Evaluaci%C3%B3n%20t%C3%A9cnica%20de%20alternativas%20de%20reciclaje%20de%20poliestireno%20expandido%20\(EPS\).pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/5033/1/Evaluaci%C3%B3n%20t%C3%A9cnica%20de%20alternativas%20de%20reciclaje%20de%20poliestireno%20expandido%20(EPS).pdf)
- Arthuz López, L., & Pérez Mora, W. (2019). Alternativas de bajo impacto ambiental para el reciclaje del poliestireno expandido a nivel mundial. *Informador técnico*, 209-219.
- ASTM-A956. (2002). Standard test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products.
- ASTM-D1002. (1999). Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal) .
- ASTM-D3121. (1994). Standard Test Method for Tack of Pressure-Sensitive Adhesives by Rolling Ball.
- ASTM-D3846. (2002). Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics.
- Beros Collío, I. A. (2006). Estudio comparativo in vitro de la tracción diametral y dureza superficial, entre una resina compuesta fluida y dos cementos de resina de curado dual. [Tesis de pregrado] Universidad de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140260>
- Cabildo Miranda, M. D. P., Claramunt Vallespi, R. M., Cornago Ramírez, M. D. P., Escolástico León, C., Esteban Santos, S., Farrán Morales, M. A., ... & Sanz del Castillo, D. (2008). Reciclado y tratamiento de residuos. Unidad didáctica (España). ISBN 8436255046.

- Camacho Morales, P. E. (2017). Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite de piñón (*Jatropha curcas*) con acetona como co-solvente a condiciones subcríticas.
- Contreras. (2015). Investigación de mercados aplicada a la gestión de poliestireno.
- Dávalos Murray, Y. R. (2015). Obtención de mezclas asfálticas mediante la adición de material reciclado: poliestireno expandido.
- García Acero, A. K., & Ochoa Rodríguez, L. N. (2011). Modelo de internacionalización del sector de reciclaje en Colombia.
- García, A. (2010). Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales.
- González Montiel, J. (2015). Acetato de etilo en la industria. *Moleqta*, 25-26.
- Hermenegildo Rodriguez Galbarro. (20 de mayo de 2017). Ingeniería mecánica. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>.
- Jaramillo Henao, G., & Zapata Márquez, L. M. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. [Monografía Especialistas en Gestión Ambiental] Universidad de Antioquia. Disponible en <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>.
- Martínez López, C., & Laines Canepa, J. R. (2014). Poliestireno expandido (EPS) y su problemática ambiental. *Kuxulakab*. 19 (36). ISSN 1665-0514. Disponible en <http://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/2327/1/-339-262-A.pdf>.
- Naidu Uttaravalli, A., Dindab, S., Radhika Gidlaa, B., Kasturia, G., Kasalaa, P., Penta, & Gayathri. (2021). Studies on development of adhesive material from post-consumer (waste) expanded polystyrene: a two-edged sword approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 312-320.
- Olivano Esquivel, A. D., López Gonzáles, A. L., & Paredes Olguín, M. (2018). Obtención de un Polímero de Alta Adherencia e Hidrofobicidad a base de poliestireno expandido reciclado. *IX Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales*. Disponible en <http://reini.utcv.edu.mx/bitstream/123456789/1164/1/Obtenci%C3%B3n%20de%20un%20Pol%C3%ADmero%20de%20Alta%20Adherencia%20e%20Hidrofobicidad%20a%20base%20de%20Poliestireno%20Expandido%20Reciclado.pdf>.

- Perdomo. (2002). Plásticos y medio ambiente. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 3 (2) ISSN 1988-4206. Recuperado de <http://reviberpol.cucei.udg.mx/pdf/publicados/perdomo.pdf>.
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312. Recuperado en 20 de noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001&lng=es&tlng=es.
- Quintero Peña, C. H. (2013). Reciclaje termo-mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios.
- Quiroz Valiente, L. A., & Solano mateo, A. (2014). Diseño de una planta industrial para la producción de acetona a partir de alcohol isopropílico.
- Quiroz, F., Chango, L., Saltos, P., & Aldas, M. (2015). Reciclaje de Poliestireno Expandido por el Método de Disolución Precipitación. *Revista politécnica*, Vol 2.
- Rodríguez, S. (2011). Residuos sólidos en Colombia: Su manejo es un compromiso de todos. *L'esprit Ingénieux*, 2 (1). 92-97.
- Runfola, & Gallardo. (2009). Análisis comparativo de los diferentes métodos de caracterización de residuos urbanos para su recolección selectiva en comunidades urbanas. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla.
- Saltos Barreiro, P. V. (2015). Diseño del proceso de reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución - precipitación. [Tesis de pregrado] Escuela Politécnica Nacional. Disponible en <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11077>.
- Saltos, Changos, Aldás, & Quiroz. (2015). Reciclaje del poliestireno expandido por el método de disolución - precipitación. *Revista politécnica*, 36 (2). Disponible en https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/592
- Samper, Rico, & Ferrándiz, L. (2008). Reducción y caracterización del residuo del poliestireno expandido. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Disponible en <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A26.pdf>
- Selukar, N., Chaitanya, L., & Ingole, C. (2014). Waste Thermocol to Adhesive for better environment. *International Journal of Innovative Research in Advanced*

Engineering. 1 (6). Disponible en <https://ijirae.com/images/downloads/vol1issue6/JYPE10080%2814%29.01.pdf>

Suárez Gómez, C. I. (2000). Problemática y gestión de residuos sólidos peligrosos en Colombia. *INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 1 (15), 41-52. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/24163>

Wong, A. (2006). Planta de reciclaje de residuos sólidos domiciliarios mediante incineración. [Tesis de pregrado] Universidad de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100787>.