



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

“USO DE RESIDUOS GENERADOS EN LA FABRICACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO PARA LA PRODUCCIÓN DE IMPERMEABILIZANTE”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA
ALFONSO RAMÍREZ TLAXCALTECATL**

**DIRECTOR DE TESIS
M.I.Q. MAGIN IDELFONSO TORREBLANCA RAMÍREZ**

Septiembre 2025

H. PUEBLA DE ZARAGOZA, PUE.



Autorización de Impresión de Tesis

Ingeniería Química AS
Ingeniería Ambiental ()
Ingeniería en Alimentos ()
Ingeniería en Materiales ()

Matrícula: 201924700




Al C. Sustentante Alfonso Ramirez Tlaxcaltecaatl

De acuerdo a la **presentación y revisión** de la tesis:

Uso de residuos generados en la fabricación de
poliestireno expandido para la producción de
impermeabilizante

se aprueba la impresión y empastado de la misma.

Jurado de examen profesional:

Presidente: Dr. Miguel Angel Garcia Castro ^{Firma} 
Secretario: Dr. José Humberto Camacho Garcia 
Vocal: M.I.Q. Magda I. Torresblanca Ramirez 

Fecha de examen: _____

H. Puebla de Zaragoza a 4 de septiembre de 2025.

Índice

Introducción	1
Planteamiento del Problema	3
Justificación	4
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
Hipótesis	6
Capítulo 1: Marco teórico	6
1.1 Antecedentes de la investigación	6
1.2 Recubrimiento primario	7
1.3 Impermeabilizantes	9
1.4 Introducción al Poliestireno Expandido	11
1.5 Propiedades del poliestireno expandido	12
1.6 Proceso de producción del poliestireno expandido	13
1.7 Impacto ambiental y alternativas sostenibles	17
1.7 Solventes	19
1.8 Gasolina	24
1.9 Limoneno	26
1.10 Funcionamiento de recubrimientos impermeabilizantes a base de EPS	29
1.11 Normativas aplicables para recubrimientos impermeables	30
Capítulo 2: Metodología	33
2.1 Pretratamiento de residuos de poliestireno expandido	33
2.2 Determinación de solvente y condiciones de mezcla	33
2.2.1 Selección de solvente	33
2.2.2 Condiciones de mezclado	35
2.2.3 Pruebas de viscosidad	39
2.2.4 Pruebas de densidad	41
2.2.5 Prueba de contenido volátil (sólidos disueltos)	42
2.3 Aplicación del recubrimiento impermeabilizante en techo	43
2.4 Validación de la operación de sellado	55
2.4.1 Grosor de la película húmeda	55
2.4.2 Tiempo de secado	56
2.4.3 Prueba de adhesión	57

2.4.4 Prueba de dureza	59
2.5 Análisis económico.....	60
2.5.1 Costos de producción	60
2.5.2 Comparación con productos similares	61
Capítulo 3: Resultados y discusión.....	63
3.1 Condiciones de mezclado.....	63
3.2 Resultados de densidad	69
3.3 Resultados de viscosidad.....	70
3.4 Resultados de contenido volátil.....	73
3.5 Resultados del espesor de la película húmeda.....	76
3.6 Resultados del tiempo de secado	79
3.7 Resultados de la prueba de adhesión.....	81
3.8 Resultados de la prueba de dureza.....	88
3.9 Aplicación del recubrimiento impermeabilizante sobre diferentes sustratos .	91
3.10 Resultados del análisis económico	95
Conclusiones	100
Bibliografía	102

Índice de Tablas

Tabla 1. Normas aplicables a recubrimientos impermeabilizantes a base de solventes orgánicos.....	31
Tabla 2. Identificación de solvente adecuado.....	34
Tabla 3. Porcentaje en peso de EPS y Gasolina.....	36
Tabla 4. Porcentaje en peso de EPS y D-limoneno.....	37
Tabla 5. Identificación de mezclador adecuado.....	44
Tabla 6. Identificación de techumbre adecuado.....	50
Tabla 7. Recursos.....	60
Tabla 8. Tiempo de disolución en Gasolina.....	68
Tabla 9. Densidad de la disolución en Gasolina.....	69
Tabla 10. Viscosidad de la disolución en Gasolina en copa FORD N°4.....	71
Tabla 11. Viscosidad de la disolución en Gasolina, prueba del lápiz.....	72
Tabla 12. Contenido volátil y no volátil de la disolución en Gasolina.....	74
Tabla 13. Espesor.....	76
Tabla 14. Tiempos de secado.....	80
Tabla 15. Resultados de área removida PVC.....	81
Tabla 16. Resultados de área removida Ladrillo.....	83
Tabla 17. Resultados de área removida Concreto.....	85
Tabla 18. Durezas.....	88
Tabla 19. Total, materia prima.....	95
Tabla 20. Total, operación directa.....	96
Tabla 21. Total, costos indirectos.....	97
Tabla 22. Composición de mezcla para 1L de recubrimiento al 15% en peso de EPS.....	97
Tabla 23. Costos para 1L de recubrimiento al 15% en peso de EPS.....	97
Tabla 24. Tabla comparativa de recubrimientos.....	98

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Recubrimientos. Getty Images. (n.d.). Impermeabilizantes imágenes de stock. Recuperado de https://www.gettyimages.es/fotos/impermeabilizantes.....</i>	8
<i>Ilustración 2. Impermeabilizante. iStock. (n.d.). Impermeabilizantes fotografía3s de stock. Recuperado de https://www.istockphoto.com/es/fotos/impermeabilizante.....</i>	9
<i>Ilustración 3. Estructura química del poliestireno. De Yikrazuul - Trabajo propio, Dominio público, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4091306.....</i>	11
<i>Ilustración 4. Imagen generada por DALL-E, OpenAI, 2024.....</i>	13
<i>Ilustración 5. Muestras de poliestireno endurecido. 5 a), 5b), 5c), 5d.....</i>	17
<i>Ilustración 6. Ejemplo de solvente. De Original: Dr. Steven P. Berg Vector: Duncan Keall, Glrx, JoKalliauer, - Na+H2O.gif, Dominio público, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3648176.....</i>	20
<i>Ilustración 7. Algunos constituyentes de la gasolina. De Boluda, C. J., Macías, M., & González Marrero, J. (2019). La complejidad química de las gasolinas de automoción. Ciencia, ingenierías & aplicaciones.....</i>	24

Ilustración 8. Estructura química del D-limoneno. De Benjah-bmm27derivative, Dominio público, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8634651	27
Ilustración 9. Materia prima.....	33
Ilustración 10. Pictogramas de la gasolina (Hoja de datos de seguridad, Gasolinas Pemex Premium y Pemex Magna, Num. Versión 2.1, 09.10.2015).....	35
Ilustración 11. Parrilla eléctrica.....	38
Ilustración 12. Mezclador casero. 12a), 12b).	38
Ilustración 13. Recipientes de plástico de 1L.	39
Ilustración 14. Copa Ford N°4.....	40
Ilustración 15. Charolas de aluminio. 15a), 15b), 15c).	42
Ilustración 16. Mezcladores. Mezclador de acero WARNER 16a), Mezclador de pintura cuadrado 16b), Mezclador para compuestos WARNER 16c), Mezclador eléctrico Rubimix 9N RUBI 16d), Mezclador de pintura 16e).	46
Ilustración 17. Inicio de la agitación.	47
Ilustración 18. 5 minutos de agitación.	47
Ilustración 19. 10 minutos de agitación.	48
Ilustración 20. 15 minutos de agitación.	48
Ilustración 21. 20 minutos de agitación.	49
Ilustración 22. Diagrama de partes por recubrir con sus dimensiones.	52
Ilustración 23. Techumbre antes.	53
Ilustración 24. Techumbre antes.	53
Ilustración 25. Limpieza de techumbre.....	54
Ilustración 26. Limpieza de techumbre.....	54
Ilustración 27. Limpieza de techumbre.....	55
Ilustración 28. Medidor de espesor.	56
Ilustración 29. Example of comb gauge. ISO (2019). ISO 2808, Paints and varnishes- Determination of film thickness. Fifth edition 2019-07 56	56
Ilustración 30. Clasificación de la adhesión por el Método A. ASTM (2023). ASTM-D3359-23, Standard test method for Rating Adhesion by Tape Test.	58
Ilustración 31. Clasificación de la adhesión por el Método B. ASTM (2023). ASTM-D3359-23, Standard test method for Rating Adhesion by Tape Test.	59
Ilustración 32. Calibre de lápices. ASTM (2022). ASTM-D3363-22, Standard test method for Film Hardness by Pencil Test.....	59
Ilustración 33. Gasolina con perla sucia de EPS en calentamiento y agitación constante.	64
Ilustración 34. D-limoneno y perla sucia de EPS con calentamiento y agitación constante.	65
Ilustración 35. Mezcla homogénea de EPS y Gasolina.	66
Ilustración 36. Sustancia blanca seca presente en el agitador. 36a), 36b).	66
Ilustración 37. Gasolina y EPS al 5%. 37a), Gasolina y EPS al 10%. 37b), Gasolina y EPS al 15%. 37c), Gasolina y EPS al 20%. 37c).	67
Ilustración 38. D-limoneno y EPS. 38a), 38b).	69
Ilustración 39. Gasolina y EPS al 5%. 39a), Gasolina y EPS al 10%. 39b), Gasolina y EPS al 15%. 39c), Gasolina y EPS al 20%. 39d).	76
Ilustración 40. 5% de EPS. 40a), 10% de EPS. 40b) y 40c), 15% de EPS. 40d) y 40e), 20% de EPS. 40f).	79

Ilustración 42. Durezas. 5% de EPS. 42a), 10% de EPS. 42b), 15% de EPS. 42c), 20% de EPS. 42d).	91
Ilustración 43. Aplicación en concreto.	91
Ilustración 44. Aplicación en ladrillo.	92
Ilustración 45. Aplicación en tubo de PVC. 45a), 45b).	93
Ilustración 46. Aplicación en lámina de PVC inflado. 46a), 46b).	93
Ilustración 47. Aplicación en techo. 47a), 47b), 47c), 47d), 47e).	94

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Tiempo de disolución.	68
Gráfico 2. Densidad.	70
Gráfico 3. Viscosidad Copa Ford.	72
Gráfico 4. Viscosidad prueba de lápiz.	73
Gráfico 5. Porcentaje de contenido volátil.	74
Gráfico 6. Contenido no volátil.	75
Gráfico 7. Espesor.	78
Gráfico 8. Tiempos de secado.	81
Gráfico 9. Durezas.	88

Introducción

El poliestireno expandido (EPS) es un material plástico ampliamente utilizado en aplicaciones de envasado, construcción y aislamiento, debido a su ligereza, resistencia mecánica y propiedades térmicas. En su proceso de fabricación, particularmente en las etapas de pre-expansión, moldeado y corte se producen grandes volúmenes de residuos sólidos en forma de polvo y perlas contaminadas, los cuales son de carácter no biodegradable y la falta de procesos de reciclaje eficientes lo convierten en un residuo contaminante, generando problemas ambientales significativos.

La investigación se centra en el aprovechamiento de residuos de poliestireno expandido, con el fin de transformar un desecho problemático en un producto con valor agregado, reduciendo el impacto ambiental.

Este proyecto de tesis explora como alternativa su reutilización mediante la disolución en solventes orgánicos como la gasolina y el D-limoneno, para la formulación de un recubrimiento impermeabilizante que ofrezca propiedades comparables a productos comerciales en términos de adherencia, resistencia y durabilidad, lo que genera un aprovechamiento dentro del marco de la economía circular y busca no solo evaluar la viabilidad técnica del producto obtenido, sino también analizar su impacto económico y ambiental, comparando sus propiedades con las de recubrimientos convencionales disponibles en el mercado.

La etapa principal del proyecto consistió en el cálculo respecto a las cantidades de soluto y solvente que se requerían para poder realizar las pruebas fisicoquímicas y las pruebas mecánicas.

Y posteriormente se realizó la aplicación de las diversas formulaciones de recubrimiento impermeabilizante (5%, 10%, 15% y 20% en peso de soluto) sobre diferentes sustratos y evaluar su densidad, viscosidad, porcentaje de contenido volátil, dureza, adhesión, secado, etc, con el fin de recabar datos experimentales que posteriormente fueron utilizados para obtener un análisis más profundo

respecto de la viabilidad de elaborar un recubrimiento a base de residuos de poliestireno expandido que generen un valor agregado.

Planteamiento del Problema

El poliestireno expandido (EPS) es un material plástico utilizado a nivel mundial debido a su ligereza, retención de calor y es fácil de manipular, así mismo es un material químicamente inerte no biodegradable, es decir que no se descompone en el medio ambiente, además de no contener clorofluorocarbonos, de este modo no puede contaminar químicamente el suelo, el agua o el aire. (López, C. M., & Cánepa, J. R. L., 2013) Sin embargo, al disponerlo en el entorno representa problemas dimensionales, siendo un desecho acumulativo ocasionando dificultades para la contención y destino final de estos.

La necesidad de una mejor calidad de vida aumenta la demanda de bienes y servicios que satisfacen al consumidor, es por eso que a nivel industrial, empresas petroquímicas y de manufactura son los principales generadores de residuos de EPS, en donde más del 70 % de los residuos plásticos son polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilo y poliestireno, este último es uno de los materiales de envasado más empleados en la sociedad hoy día y, al igual que otros productos de embalaje, una vez que llegan al final de su vida útil son desechados en vertederos a cielo abierto, tardando 150 años en descomponerse, (López, D., Rhenals, P., Tangarife, M. A., Vega, K., Rendón, L., Vélez, Y., & Ramírez, M., 2014) representado un desafío crítico en la gestión de residuos sólidos puesto que su recolección y reciclaje representan altos costos operativos y poco eficientes.

Con base en lo anterior, es importante tener presente que el proceso de fabricación de poliestireno expandido consta de tres etapas: la pre-expansión, la cual es un proceso de intercambio de calor, calentando las perlas de poliestireno; la estabilización y secado, en donde las perlas pre-expandidas son almacenadas en silos con una adecuada ventilación durante 24 horas para posteriormente terminar con la última etapa que es el moldeado, donde se genera una segunda expansión mediante un proceso de calentamiento formando bloques de EPS o cualquier otro producto y que a partir de su fabricación, se presentan puntos de generación de residuos.

Durante este proceso se presenta como residuo la perla de estireno contaminada debido a su mal manejo en la etapa de alimentación y posterior contaminación, la generación de polvo, debido al calentamiento de las perlas, lo que genera fricción entre ellas, así como los cortes en la etapa de moldeado, transportes neumáticos y ciclones utilizados para la separación de partículas, donde se genera el residuo.

Ante este panorama, se observa la necesidad de realizar investigaciones que permitan la reutilización de residuos obtenidos sobre la línea de producción de EPS (perla contaminada y polvo) convirtiéndolos en productos que representen un valor agregado.

Además, múltiples investigaciones proponen la disolución del EPS en solventes como lo son la mezcla de hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos (gasolina) y D-limoneno para la elaboración de productos tales como recubrimientos impermeabilizantes, a lo cual una de las limitantes es la sostenibilidad de los solventes y la viabilidad técnica de los productos obtenidos.

Justificación

La falta de opciones viables para su reciclaje ha hecho que muchas empresas petroquímicas desechen grandes volúmenes de poliestireno expandido en diferentes formas, sin embargo y de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 las cuales regulan la gestión de residuos plásticos (como el EPS), señalan como responsable a las empresas respecto a su disposición adecuada, promoviendo el reciclaje y la reutilización.

De acuerdo con la literatura, el uso de solventes accesibles y sostenibles permiten la disolución del EPS, transformándose en productos con valor agregado. Estos productos, además de reducir el impacto ambiental, ofrecen una solución económica y práctica que puede beneficiar tanto a las empresas como al medio ambiente.

La investigación se justifica proponiendo una alternativa que resulte ser innovadora para la reutilización de residuos obtenidos sobre la línea de producción de EPS

(perla contaminada y polvo) por medio de su transformación en un producto con valor agregado, el cual propone disminuir la acumulación de residuos plásticos, contribuyendo con la creación de un producto de propiedades específicas como ligero, buen aislante térmico y resistente.

El desarrollo de la investigación está enfocado en la exploración de darle un segundo uso, como lo es el recubrimiento impermeabilizante para techos a base de residuos obtenidos sobre la línea de producción de EPS (perla contaminada y polvo) obtenidos de la línea de producción, con el fin de evitar su disposición inadecuada al entorno natural, contribuyendo al ahorro energético, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y continuando con los principios de la economía circular. Por tanto, esta investigación se alinea con los objetivos de sostenibilidad y gestión ambiental, que propone alternativas innovadoras.

Objetivo General

Uso de residuos de poliestireno expandido (perla contaminada y polvo) obtenidos de la producción de extruidos de EPS para el desarrollo de una mezcla viscosa homogénea mediante su disolución en solventes para la fabricación de un recubrimiento impermeabilizante.

Objetivos Específicos

- Comparar la eficiencia de diferentes solventes en la disolución de los residuos de poliestireno expandido (perla y polvo).
- Determinar las condiciones óptimas del proceso de disolución los residuos de poliestireno expandido (perla y polvo) en solventes seleccionados.
- Comparar el comportamiento de las formulaciones obtenidas con recubrimientos comerciales de origen orgánico y polimérico.
- Evaluar las propiedades de densidad, viscosidad y sólidos disueltos del recubrimiento impermeabilizante a diferentes concentraciones.
- Analizar el comportamiento físico del recubrimiento, considerando su dureza, tiempo de secado, grosor y adherencia.

Hipótesis

La disolución de los residuos de poliestireno expandido (perla y polvo) en solventes como la mezcla de hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos (gasolina) y D-limoneno crea un agente impermeabilizante con propiedades mecánicas comparables a las de los productos comerciales convencionales, mejorando la gestión de residuos plásticos y reduciendo el impacto ambiental.

Capítulo 1: Marco teórico

1.1 Antecedentes de la investigación

El reciclaje de poliestireno expandido (EPS) ha sido abordado con diferentes enfoques que coinciden en la utilización de solventes para su disolución, destacando el uso de solventes orgánicos tradicionales como solventes verdes. Estas investigaciones presentan un interés común en transformar los residuos de EPS en materiales con aplicaciones útiles, tales como adhesivos, recubrimientos o barnices, que, pese a la diversidad de solventes empleados, se observan comportamientos similares en cuanto a la eficiencia del proceso y las propiedades finales de los productos obtenidos.

En el trabajo de graduación de Arriola Lara, E. A. et al. (2013, p.108) "*Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)*" se propone el tratamiento de residuos de poliestireno expandido mediante su disolución en solventes orgánicos (butanol, acetona, hexano, heptano, metil etil cetona, tolueno, acetato de etilo, xileno, butil acetato) para generar adhesivos. De manera complementaria, López, D. et al. (2014, p.1, 7) "*Tratamiento de residuos de poliestireno expandido utilizando solventes verdes.*" aplicaron solventes verdes, específicamente D-limoneno, para el tratamiento del EPS, concluyendo que las condiciones de temperatura y agitación (30°C a 80°C y 310 a 500 rpm) son determinantes para lograr cambios significativos en la mezcla, lo que muestra una similitud en el efecto de los parámetros de operación sobre la eficiencia de la disolución.

De manera análoga, Avellaneda Díaz, D. C. (2017, p.28) "*Evaluación para la obtención de un recubrimiento con resina a base de poliestireno expandido reciclado a nivel laboratorio.*" plantea la obtención de un recubrimiento a base de poliestireno expandido reciclado y D-limoneno, señalando que este solvente verde posee características comparables a las del tolueno a temperatura ambiente. Este planteamiento guarda relación con la investigación de Alberola, R. A. et al. (2014, p.6) "*Eco-estireno De no Reciclable a Re-utilizable.*", quienes propusieron la elaboración de un barniz a partir de desechos de unicel disueltos en acetona, alcohol y acetato de etilo, confirmando la versatilidad de distintos solventes en la producción de materiales funcionales a partir del EPS.

Así mismo, Mendoza, I. D. P. et al. (2021, p.1) "*Efecto de la concentración y temperatura en la disolución de poliestireno expandido usando solventes naturales.*" estudiaron la disolución de EPS con D-limoneno y aceite de eucalipto, encontrando que el aumento de temperatura (20°C a 50°C) favorece el proceso, siendo el D-limoneno el que presenta mejor miscibilidad. Este resultado coincide con los hallazgos de García, M. T. et al. (2009, p.1818) "*Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process.*", quienes señalaron que los solventes con compuestos aromáticos o terpenos, como el D-limoneno, presentan interacciones favorables debido a sus puentes de hidrógeno débiles, siendo biodegradables y sin degradar las cadenas poliméricas, reforzando la viabilidad de este solvente como una alternativa sustentable.

1.2 Recubrimiento primario

Los recubrimientos primarios, también conocidos como imprimaciones, son materiales aplicados como primera capa en un sistema de revestimiento con el objetivo de preparar el sustrato para capas posteriores. Su función principal es mejorar la adherencia entre la superficie y las capas de recubrimiento finales, así como ofrecer protección inicial contra la corrosión y la humedad. Estos recubrimientos son esenciales para garantizar la durabilidad y funcionalidad de sistemas de pintura o revestimiento en sectores como la construcción, industria

automotriz y la protección de estructuras metálicas expuestas al ambiente. (Jones D.A., 2013)



Ilustración 1. Recubrimientos. Getty Images. (n.d.). Impermeabilizantes imágenes de stock. Recuperado de <https://www.gettyimages.es/fotos/impermeabilizantes>

Las propiedades de los recubrimientos primarios están diseñadas para satisfacer necesidades específicas según el tipo de sustrato y las condiciones de exposición. Una de las propiedades más importantes es su adherencia, la cual garantiza que tanto el recubrimiento como las capas posteriores permanezcan firmemente unidas al sustrato. También presentan resistencia química a la corrosión, protegiendo superficies metálicas contra la oxidación mediante la incorporación de compuestos inhibidores como el fosfato de zinc o el óxido de hierro, además de que asegura que no ocurran reacciones químicas indeseables entre el primario y los recubrimientos. (Jones D.A., 2013)

También pueden actuar como selladores, reduciendo la porosidad de materiales como madera o concreto, evitando la absorción excesiva de pintura o acabados. (Perry & Green, 1997)

Se utilizan en una amplia variedad de sectores debido a su versatilidad y propiedades protectoras. En el sector de la construcción, fundamentalmente para proteger estructuras metálicas, paredes de concreto y superficies de madera antes de la aplicación de pinturas arquitectónicas.

En la industria automotriz se emplean en carrocerías metálicas como una capa anticorrosiva que garantiza la adherencia de las capas de pintura y la resistencia a condiciones ambientales adversas. En el ámbito industrial se aplican sobre

maquinaria, tuberías y equipos expuestos a ambientes agresivos. (Jones, 2013) Es por lo que existen diferentes tipos de recubrimientos primarios, los cuales son:

- Acrílicos: a base de polímeros acrílicos, utilizados en aplicaciones arquitectónicas debido a su secado rápido, de bajo impacto ambiental y compatibilidad con diversos acabados. (Jones, 2013)
- Poliuretanos: buena resistencia a la radiación UV, ideales para aplicaciones en exteriores. (Perry & Green, 1997)

1.3 Impermeabilizantes

Un impermeabilizante es un material o sustancia que se aplica sobre superficies con el objetivo de evitar el paso o filtración de agua u otros líquidos. Su función principal es crear una barrera física o química que proteja las estructuras de los daños causados por la humedad, la corrosión, el deterioro de algún material o el crecimiento de microorganismos. Los impermeabilizantes se utilizan ampliamente en sectores como la construcción, infraestructura e inclusive la industria química, garantizando la durabilidad de los materiales y estructuras expuestas a condiciones ambientales adversas. (Perry & Green, 1997)

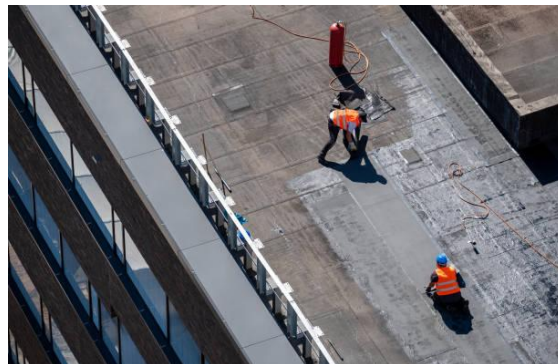


Ilustración 2. Impermeabilizante. iStock. (n.d.). Impermeabilizantes fotografía3s de stock. Recuperado de <https://www.istockphoto.com/es/fotos/impermeabilizante>

Las propiedades de los impermeabilizantes varían según su composición química y el tipo de aplicación, donde la mayoría presentan resistencia al paso de líquidos bajo diferentes condiciones hidrostáticas, siendo impermeables, además de ser elásticos, es decir, cuentan con la propiedad para adaptarse a movimientos

estructurales o contracciones y dilataciones térmicas sin fracturarse o romperse por completo. (Jones, 2013)

En algunos casos y dependiendo del tipo de impermeable que se aplique, estos pueden llegar a ser resistentes al ataque de productos químicos como los ácidos o sales, (Perry & Green, 1997) del mismo modo conservan sus propiedades físicas y químicas frente a la exposición prolongada a los rayos UV, al agua y cambios de temperatura, dando propiedades de durabilidad y resistencia química.

Además, cuenta con la característica de unirse firmemente a superficies las cuales son aplicadas, lo que asegura la continuidad de la barrera impermeable (Perry & Green, 1997) y brindando propiedades mecánicas como la resistencia al desgaste, abrasión y/o rozamiento según sea el caso. (Jones, 2013)

Los impermeabilizantes tienen múltiples aplicaciones, dependiendo el tipo de construcción o superficie que se quiera proteger.

En techos y azoteas se utilizan para prevenir filtraciones de agua de lluvia y proteger las estructuras subyacentes, en cimentaciones y sótanos son indispensables para evitar el paso del agua subterránea, específicamente en áreas con altos niveles freáticos. También se emplean en depósitos y tanques de agua, de este modo de garantiza la estanqueidad y prevención de fugas. (Perry & Green, 1997) En la construcción de carreteras y puentes ayudan a preservar las estructuras contra el agua y sales corrosivas, además de contar con aplicaciones industriales y alimentarias, siendo usados para proteger superficies en contacto con líquidos agresivos o ambientes húmedos. (Jones, 2013)

Los impermeabilizantes se clasifican de acuerdo con su composición y método de aplicación.

- Acrílicos: elaborados a partir de polímeros acrílicos en emulsión acuosa, populares por su flexibilidad, fácil aplicación y larga duración, ideales para techos y fachadas. (Jones, 2013)

- Poliuretano (EPDM): cuentan elasticidad y resistencia química, hechas de caucho sintético, resistentes a la exposición de luz UV, aunque su precio es elevado en comparación a otros impermeabilizantes. (Perry & Green, 1997)

1.4 Introducción al Poliestireno Expandido

Se define técnicamente como un material plástico celular y rígido fabricado a partir de perlas pre-expandidas de poliestireno que presentan una estructura cerrada y rellena de aire. El poliestireno expandido (EPS por sus siglas en inglés) es un polímero derivado de los hidrocarburos (petróleo y gas natural), muy versátil debido a su ligereza, aislamiento térmico y su resistencia a la compresión. Durante su producción, las perlas de poliestireno se expanden, creando una estructura celular cerrada que atrapa el aire, dándole propiedades únicas que lo hacen altamente versátil (PlasticsEurope, 2021).

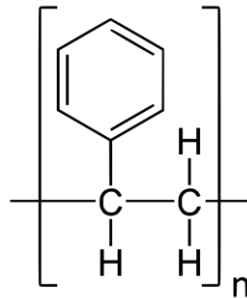


Ilustración 3. Estructura química del poliestireno. De Yikrazuul - Trabajo propio, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4091306>

Es un plástico económico y resistente, el cual se encuentra en la vida cotidiana mediante diferentes presentaciones y productos como en construcción, embalaje y envase, por ejemplo, en vasos y platos desechables, la cubierta exterior de una computadora hecha de poliestireno, en forma de espuma para envoltorio, para moldes de autopartes y como aislante. (Quintero Peña, C. H., 2013)

Ampliamente utilizado en sectores industriales tales como:

El sector de la construcción: útil en aplicaciones de aislamiento térmico y acústico de acuerdo con la necesidad de la construcción, ya sea en paredes, techos, suelos, como relleno de orificios o la fabricación de moldes.

El sector de transporte y embalaje: en la necesidad de protección de productos frágiles durante el transporte y almacenamiento, así como la contención de refrigeración y congelación de algunos alimentos. Además de ser ampliamente utilizado como material de flotación implementado en boyas, salvavidas y otros dispositivos de flotación. (Gibson, 2016)

1.5 Propiedades del poliestireno expandido

Algunas de las propiedades que lo hacen tan útil en sectores como la construcción, el embalaje, y la fabricación de productos desechables (vasos y platos). (López & Cánepa, 2013) son:

Densidad: entre 12 kg/m³ a 48 kg/m³ (ASTM C578-01), considerado de baja densidad otorgando propiedades de ligereza y fácil manipulación, útil en aplicaciones como en la construcción y el embalaje.

Resistencia a la compresión a 10% de deformación: entre 35 kPa a 690 kPa (ASTM C578-01) presentando buena resistencia a la compresión, lo que lo convierte en un material adecuado para elementos estructurales y de soporte.

Flotabilidad, % en volumen de oxígeno en su estructura: sin importar el tipo de poliestireno, es del 24% de oxígeno (ASTM C578-01), ligado a la propiedad de baja densidad, generando la característica de flotar sobre el agua, además lo hace ideal para el uso en dispositivos de flotación, como boyas y salvavidas.

Aislamiento térmico: su estructura celular cerrada ligada al volumen de aire que contiene, actúan como barrera para la transferencia de calor, siendo un material ideal en aplicaciones de construcción y embalaje. Esta propiedad se debe a que las pequeñas celdas de aire atrapadas en la estructura del EPS actúan como barrera para la transferencia de calor.

Aislamiento acústico: también absorbe el sonido, reduciendo la transmisión del ruido, siendo útil en el control acústico como en estudios de grabación y salas de cine.

Resistencia química: es resistente a la degradación mediante el uso de ácidos y bases, así como a la sal y agua, dándole propiedades de durabilidad y resistencia a la degradación bajo condiciones ambientales. (Gibson, 2016)

A pesar de que es un material plástico versátil y resistente a condiciones ambientales, existen alternativas en su proceso de fabricación con el objetivo de ampliar sus aplicaciones mejorando sus propiedades; una de ellas es la incorporación de aditivos, como agentes flama retardantes, colorantes o agentes antiestáticos.

1.6 Proceso de producción del poliestireno expandido

El poliestireno expandido específicamente utilizado para fabricar bovedillas y blocks que se produce a partir del monómero de estireno en forma de perla pre-expandida.



Ilustración 4. Imagen generada por DALL-E, OpenAI, 2024

Dicho proceso consta de diversas etapas en las cuales se identifican varios puntos significativos de generación de residuos, como polvo, acumulación de material no conformado y materia prima solidificada.

- Pre-expansión de poliestireno

La materia prima (monómero de estireno en forma de perla) impregnada con un agente de expansión, generalmente pentano, se somete a un proceso de intercambio de calor en el cual cada perla llega a expandir su volumen entre 20 y 50 veces su tamaño original.

En este paso, existe la posibilidad de generar residuos en forma de poliestireno expandido fuera de especificación, además de pérdida de perlas muy finas o polvo generado durante el proceso de expansión.

De acuerdo con un informe de la *Society of Plastic Engineers (SPE)*, el 1-3% de la materia prima puede perderse en esta etapa debido a la rotura de perlas o por arrastre en el sistema de transporte neumático (SPE Journal, 2022).-

Según el *Environmental Protection Agency (EPA)*, menciona que, durante el proceso de pre-expansión, pequeñas partículas de EPS pueden liberarse al ambiente, lo cual requiere controles adecuados de polvo (EPA, 2021)

- Estabilización y secado

Luego de la pre-expansión, las perlas se enfrían y estabilizan en silos para la liberación de agentes de expansión residuales, así como homogeneizar su densidad. En este punto, se generan residuos de material que no logra la densidad requerida como producto final o en algunos casos el material se degrada por la exposición prolongada a condiciones ambientales.

De acuerdo con un estudio de la *European Plastic Converters Association* indica que entre el 2% y 5% del material es descartado por el incumplimiento de la especificación respecto a su densidad (EuPC Report, 2020).

- Moldeado primario

Posteriormente se transfieren a moldes cerrados para nuevamente ser sometidas a un proceso de calentamiento, de este fusionarlas en bloques o bovedillas de EPS. En este paso se presentan fugas del material en los moldes, formación de bloques defectuosos o acumulación de materia fundida solidificada en los mismos moldes.

De acuerdo con la *Plastic Waste Management Institute*, las fugas del material y defectos en el moldeado representan hasta el 5% del desperdicio total en las plantas productoras de bloques de EPS (Plastic Waste Report, 2022).

Así mismo, la *International Energy Agency (IEA)* menciona que la acumulación de residuos solidificados en los moldes aumenta el desperdicio y requiere una limpieza constante, generando más desecho (IEA, 2021).

- Corte y acabado

Los bloques solidificados de EPS se cortan y dan forma mediante un proceso de corte, utilizando alambres a altas temperaturas o sierras, de este modo se obtienen las dimensiones finales de las bovedillas o bloques; siendo este punto uno de los principales puntos generadores de residuos, puesto que los recortes generan polvo, así como material fuera de especificación, constituyendo hasta el 30% del volumen procesado.

De acuerdo con un informe de la United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), las pérdidas durante el proceso de corte pueden llegar al 20% - 30% dependiendo de la precisión y equipo utilizado (UNIDO Technical Report, 2021).

- Almacenamiento y transporte

El producto terminado (bloques y bovedillas) puede sufrir daños durante el almacenamiento y/o transporte, esto debido a golpes o deformaciones, generando residuos como piezas defectuosas.

Según la *Food and Agriculture Organization (FAO)*, entre el 1% y 3% de los productos de EPS son desechados en esta etapa, especialmente si no se cuenta con un sistema de protección adecuado (FAO, 2021).

Durante el proceso de elaboración de EPS, las perlas pre-expandidas y los bloques de material producen residuos, el corte y el transporte neumática son en las etapas donde más residuos se genera. Los sistemas de recirculación permiten atrapar y regresar las partículas suspendidas en el flujo de aire al proceso de producción esto con la ayuda de ciclones y compresores que regresan las partículas al silo de estabilización o al área de moldeo.

Esta práctica reduce significativamente los desechos sólidos y mejora la optimización de la materia prima, al recircular partículas se reduce la acumulación en ductos y maquinas, lo que prolonga la vida útil de los equipos (Perry, Green, & Maloney, 2019). Esta medida disminuye la emisión de polvos al ambiente y facilita el cumplimiento normativo /ASHRAE, 2016.

En la etapa de moldeo, el material fundido se llega a solidificar fuera del molde, este material puede ser recuperado y reutilizado. Mediante sistemas de triturado los bloques sobrantes o acumulaciones solidas se desmenuzan en partículas pequeñas, estas partículas pueden ser recirculadas en el pre-expansor o mezclarse con perlas nuevas. Sin embargo, es importante controlar las propiedades del material reciclado para garantizar la calidad del producto final.

En la etapa final, el corte de los bloques o bovedillas genera cantidades considerables de residuos en forma de partículas finas, los sensores y cámaras en las líneas de corte permite monitorear el nivel de residuos en tiempo real. Además, los sistemas de control automatizado pueden ajustar la velocidad de corte o el uso de cuchillas terminas para minimizar las partículas generadas.

Este enfoque no solo reduce la generación de residuos, sino que también mejora la eficiencia del proceso. Las cuchillas térmicas son ajuste de temperatura generan cortes más limpios, lo cual minimiza la cantidad de material perdido (ASHRAE, 2016).

Es por lo que el diseño de equipos como moldes y líneas de transporte, es esencial para reducir la cantidad de partículas generadas. Los moldes deben ser fabricados con tolerancias precisas para evitar desbordamientos de material fundido, asimismo, las líneas de transporte deben tener una inclinación y diámetro óptimos para evitar la acumulación de perlas o material reciclado en los ductos.

Obteniendo como beneficios de estos sistemas mejoras en la calidad del aire dentro de las instalaciones, reduciendo riegos de salud para los operadores (OSHA, 2023) y el cumplimiento normativo con estándares ambientales que regulen la emisión de partículas suspendidas en el aire (OSHA, 2023).



Ilustración 5. Muestras de poliestireno endurecido. 5 a), 5b), 5c), 5d.

1.7 Impacto ambiental y alternativas sostenibles

A pesar de ser un material versátil con una amplia gama de aplicaciones gracias a sus propiedades únicas, presenta desafíos ambientales significativos debido a su constante uso, un ejemplo común es su utilización para el almacenamiento de comida, generando grandes cantidades de basura, terminando en vertederos o siendo incinerados (Poletto, M, 2011), lo que causa problemas ambientales graves, aún más si las normas ambientales no se cumplen. Algunas de las problemáticas ambientales que presenta el EPS son:

No biodegradable: tarda cientos de años en descomponerse en la naturaleza. (López C.M., 2013)

Contaminación: los residuos de EPS se pueden trasladar fácilmente por medio de canales de agua o drenajes, lo que genera su acumulación en el medio ambiente, afectando la fauna y los ecosistemas. (Quintero Peña, C. H., 2013)

Liberación de sustancias tóxicas: mediante su incineración, libera sustancias tóxicas y contaminantes al aire. (Al-Salem et al., 2009)

Producción de gases de efecto invernadero: la producción de poliestireno expandido genera gases de efecto invernadero (CO₂) (Quintero Peña, C. H., 2013) así como la generación de desechos sólidos y líquidos, ocupando el quinto puesto en la cantidad de desperdicios sólidos peligrosos generados en estados unidos según la *Agencia de Protección por el Medio Ambiente* (EPA, 2008).

También conocido comúnmente como espuma de poliestireno o “unicel”, ampliamente utilizado, sin embargo, su ciclo de vida es muy corto y sin alternativas para su reutilización inmediata, lo que plantea retos ambientales significativos. (PlasticEurope, 2020)

Fase de uso: relacionado con su utilización y la razón por la cual es ampliamente utilizado, siendo: embalaje, protección de productos, aislamiento térmico en la construcción y envases alimenticios desechables. (Singh et al., 2017)

Disposición final: es uno de los aspectos más problemáticos en el ciclo de vida del EPS debido a su resistencia a la descomposición natural, existiendo varios destinos para los residuos, como:

- Vertederos: un alto porcentaje de residuos termina en vertederos debido a su bajo costo de disposición y la falta de infraestructuras para su reciclaje, ocupando un volumen significativo, contribuyendo a la saturación de estos.
- Incineración: su incineración es una opción de disposición que reduce el volumen de residuos, así mismo genera emisiones de gases de efecto invernadero.
- Reciclaje: existen métodos de reciclaje para el EPS, aunque su aplicación está limitada debido a desafíos económicos y logísticos. (Hopewell et al., 2009)

Debido a esta problemática, en los últimos años se ha implementado la búsqueda de diversas investigaciones relacionadas con el desarrollo de tecnologías para reducir su impacto ambiental, como el reciclaje mediante alternativas sostenibles. (Hopewell et al., 2019)

Si bien, el EPS es difícil de reciclar debido a su baja densidad y su estructura celular, existen algunas tecnologías que permiten su recuperación y valorización:

Reciclaje mecánico: se tritura y es utilizado como materia prima para la fabricación de nuevos productos, como marcos de cuadros, molduras o relleno de aislamiento.

Reciclaje químico: se descompone en sus componentes químicos originales para ser reutilizados en la producción de nuevos plásticos.

Pirólisis: es sometido a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, produciendo un aceite que puede ser utilizado como combustible o como materia prima para la fabricación de nuevos productos. (Al-Salem et al., 2009)

1.7 Solventes

En términos científicos, un solvente es una sustancia, usualmente en fase líquida, que tiene la capacidad de disolver a otras sustancias (conocido como soluto), generando una solución homogénea sin que ocurra una reacción química significativa entre ambos componentes. Esta capacidad de disolución depende de la interacción molecular entre el solvente y el soluto, caracterizada por fuerzas intermoleculares como el enlace de hidrógeno, las interacciones de van der Waals o la polaridad del solvente. Los solventes juegan un papel esencial en química e ingeniería química, ya que facilitan procesos como la síntesis de compuestos, extracción, purificación y formulación de productos. (Smith, 2013)

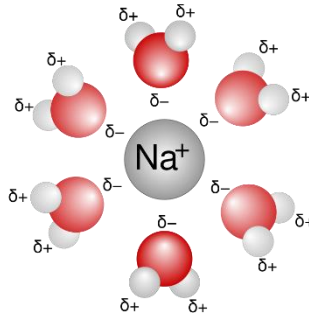


Ilustración 6. Ejemplo de solvente. De Original: Dr. Steven P. Berg Vector: Duncan Keall, Glrx, JoKalliauer, - Na+H2O.gif, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3648176>

Las propiedades físicas de los solventes determinan su capacidad para disolver diferentes solutos y desempeñar funciones específicas en reacciones químicas y procesos de separación.

Densidad: La densidad de un solvente es la relación entre su masa y volumen expresada en g/cm³ o kg/L. La densidad influye en la selección de solventes para la separación por flotación y es un factor importante en mezclas y emulsiones. Por ejemplos los solventes no polares como el hexano tienen menor densidad que los solventes polares como el agua. (Atkis & de Paula, 2017)

Punto de ebullición: El punto de ebullición es a temperatura a la cual la presión de vapor del solvente es igual a la presión atmosférica, permitiendo su paso de fase líquida a gas. Esta propiedad es crucial en destilación y separación de componentes en mezclas complejas. Los solventes de bajo punto de ebullición como el éter dietílico se usan para aplicaciones donde la evaporación rápida es deseable, mientras que los solventes con punto de ebullición alto como el dimetilfóxido, se prefiere en procesos donde se requiere estabilidad térmica. (Smith, 2013)

Presión de vapor: La presión de vapor es la presión ejercida por las moléculas de un solvente en equilibrio en fase gaseosa sobre su fase líquida. Los solventes con alta presión de vapor como el acetato de etilo se evaporan rápidamente y son útiles en aplicaciones de secado rápido; en contraste con solventes de baja presión de vapor como el propilenglicol que permanecen en fase líquida por periodos

prolongados y son usados en formulaciones de liberación prolongada. (Atkis & de Paula, 2017)

Viscosidad: La viscosidad de un solvente mide su resistencia al flujo, influenciada por las fuerzas intermoleculares y el tamaño de las moléculas. Solventes de baja viscosidad como el etanol, influyen fácilmente y facilitan la mezcla, mientras que los de alta viscosidad como el glicerol son útiles en aplicaciones que requieren consistencia y adherencia. (Smith, 2013)

Constante dieléctrica: La constante dieléctrica mide la capacidad de un solvente para reducir sus fuerzas electrostáticas entre iones disueltos. Solventes con un alta constante dieléctrica como lo es el agua, pueden disolver fácilmente compuestos iónicos, mientras que los de baja constante dieléctrica como el hexano son ideales para disolver compuestos no polares. (Atkis & de Paula, 2017)

Las propiedades químicas determinan la reactividad y la selectividad de los solventes en diferentes reacciones y su capacidad para formar enlaces con los solutos.

Polaridad: La polaridad de un solvente está determinada por la distribución de cargas eléctricas en sus moléculas. Los solventes polares como el agua y el metanol poseen momentos dipolares elevados y pueden estabilizar especies cargadas. Los solventes polares como el benceno tienen la polaridad baja, siendo idóneo para disolver compuestos no polares. (Smith, 2013)

Capacidad protica y aprotica: Para solventes proticos, estos contienen hidrógeno enlazado a un átomo electronegativo y pueden formar enlaces de hidrógeno, como el agua y el ácido acético. Estos solventes estabilizan aniones y facilitan ciertas reacciones químicas como las S_N. Para solventes aproticos son aquellos que carecen de hidrógeno enlazado a átomos electronegativos como la acetona. Son importantes en reacciones S_N2 al no solubilizar cationes y permitir que los nucleófilos conserven su reactividad. (Atkis & de Paula, 2017)

Basicidad y acidez: La acidez y basicidad de los solventes se mide a través de escalas como pK_a y pK_b, que determinan la habilidad de un solvente para donar o

aceptar protones. Los solventes ácidos como el ácido acético pueden donar protones, mientras que los básicos como la piridina pueden aceptarlos, lo cual es esencial en reacciones de neutralización y transferencia de protones. (Smith, 2013)

Reactividad química: Algunos solventes son químicamente reactivos y pueden participar en reacciones químicas, por ejemplo, el metanol puede reaccionar con ácidos fuertes formando derivados metílicos, mientras que el cloroformo puede generar radicales libres en presencia de luz ultravioleta, lo cual es relevante en aplicaciones de síntesis química. (Smith, 2013)

Solvatación: La capacidad de solvatación es la habilidad del solvente para rodear y estabilizar iones o moléculas mediante fuerzas de interacción. En solventes polares como el agua, la solvatación es intensa debido a los enlaces de hidrógeno, mientras que, en solventes no polares como el tolueno, las interacciones son principalmente de tipo van der Waals. (Atkis & de Paula, 2017)

Los solventes cuentan con una gama de aplicaciones en sectores industriales, de carácter científico y de uso doméstico, de las cuales destacan la industria química y farmacéutica, con utilidad en la síntesis de productos químicos y medicamentos, en procesos de extracción de principios activos y en formulaciones finales de fármacos. (Smith, 2013) Para la industria cosmética son empleados solventes para la formación de productos como perfumes, desodorantes, esmaltes y removedores de esmalte. (Smith, 2013)

En cuanto a la industria de la limpieza y desengrasado, solventes como el tolueno y los clorados son útiles en la limpieza de superficies metálicas, equipos industriales y en aplicaciones de desengrasado. (Smith, 2013) Además de que en la industria de pinturas y recubrimientos los solventes actúan como vehículos para aplicar pinturas y barnices, permitiendo la dispersión homogénea de pigmentos y mejorando la adhesión de los recubrimientos a diversas superficies. (Atkis & de Paula, 2017)

Se pueden clasificar en función de su polaridad y naturaleza química, misma que permite identificar y seleccionar el solvente adecuado según las necesidades del proceso o aplicación deseada.

- Solventes polares: cuentan con una constante dieléctrica alta y permitiendo la formación de enlaces de hidrógeno, además de ser miscibles con otros solventes polares. Estos Solventes disuelven sustancias iónicas y polares, utilizados en reacciones donde se busca una alta capacidad de disolución de compuestos iónicos. Ejemplos incluyen el agua, acetona, metanol y etanol. (Smith, 2013)
- Solventes no polares: su constante dieléctrica es menor a la de solventes polares, por lo cual no forman enlaces de hidrógeno, convirtiéndolos en compuestos ideales para disolver sustancias no polares como grasas, aceites y ceras, así mismo no son miscibles con solventes polares y generalmente son inertes en reacciones químicas. Ejemplos incluyen hexano, benceno y éter de petróleo. (Smith, 2013)
- Solventes proticos: caracterizado por contener un átomo de hidrógeno unido a un átomo electronegativo (como oxígeno o nitrógeno), permitiendo la formación de enlaces de hidrógeno, lo que les brinda la característica de ser altamente polares, utilizados en reacciones de disolución de sustancias iónicas. Ejemplos incluyen al agua, metanol y ácido acético. (Atkis & de Paula, 2017)
- Solventes aproticos: No cuentan con hidrógeno unido a un átomo electronegativo, por lo que no participan en enlaces de hidrógeno, volviéndolos útil en reacciones que requieren solventes polares sin formación de enlaces de hidrógeno con el soluto. Usualmente utilizados en síntesis orgánicas donde se necesita disolver compuestos polares. Ejemplos incluyen al acetona, dimetilsulfóxido y tetrahidrofurano. (Smith, 2013)
- Solventes orgánicos: cuentan con estructuras de carbono, comúnmente utilizados en la industria química y farmacéutica. Algunos presentan características de toxicidad, requiriendo un control específico al momento de utilizarlo. Algunos ejemplos son el etanol, tolueno y cloroformo. (Smith, 2013)

- Solventes inorgánicos: no cuentan con carbono en su estructura molecular, empleados en reacciones específicas como en la industria metalúrgica o de síntesis de compuestos inorgánicos. Algunos ejemplos son el ácido sulfúrico y agua. (Atkis & de Paula, 2017)

1.8 Gasolina

La gasolina es una mezcla derivada de petróleo, que estructuralmente se pueden dividir en parafinas, olefinas, cicloparafinas y aromáticos (Boluda, C. J., 2019) o bien en hidrocarburos alifáticos (hexano, heptano, octano, etc.) e hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, xileno, etc.), (Speight, 2014) además de que puede contener compuestos oxigenados (alcoholes y éteres), proporcionándole esa complejidad química de la gasolina debido a la cantidad elevada de diferentes componentes que la conforman, puesto que se presentan casi todos los isómeros posibles de hidrocarburos (entre 4 y 12 átomos de carbono), (Boluda, C. J., 2019) lo que determina sus propiedades físicas y químicas.













Benceno		Tolueno	
2,4,4-Trimetil-2-penteno		Etanol	CH ₃ CH ₂ OH
tert-Butanol		Propilbenceno	
Metanol	CH ₃ OH		
Isooctano		1,3,5-Trimetilbenceno	
Isopropanol			
o-Xileno		m-xileno	
Etilbenceno		p-Xileno	

Ilustración 7. Algunos constituyentes de la gasolina. De Boluda, C. J., Macías, M., & González Marrero, J. (2019). La complejidad química de las gasolinas de automoción. Ciencia, ingenierías & aplicaciones.

Densidad: su densidad es menor a la densidad del agua, lo cual es aproximadamente 0.7 a 0.8 g/cm³, útil en aplicaciones de separación.

Punto de ebullición: debido a que es una mezcla de varios compuestos, no cuenta con un punto de ebullición definido, por lo que la mayoría de sus componentes

ebullen de los 30 °C y 200 °C, permitiendo su uso en procesos de evaporación rápida.

Presión de vapor: cuenta con una presión de vapor relativamente alta, mayor a 50 kPa a 28 °C, brindándole la propiedad característica de alta volatilidad (fácil evaporación).

Viscosidad: mezcla de baja viscosidad, aproximadamente de 0.5 cP a 20 °C, permitiendo su fácil manipulación, mezclado y dispersión como solvente. (Speight, 2014)

Polaridad: debido a que está conformado por hidrocarburos, la gasolina es un solvente apolar, esta propiedad permite disolver sustancias no polares, como grasas y aceites, e incapaz de disolver compuestos iónicos o polares como sales y agua.

Estabilidad química: a pesar de ser una mezcla estable en condiciones normales, la gasolina es inflamable y presenta riesgos de oxidación al estar en contacto con el oxígeno y temperaturas elevadas.

Interacción molecular: siendo una mezcla conformada por diferentes tipos e hidrocarburos, las fuerzas de tipo van der Waals son las principales interacciones intermoleculares, limitando sus capacidades para formar enlaces de hidrogeno o disolver sustancias polares. (Speight, 2014)

Es una mezcla de hidrocarburos de uso diario que específicamente por sus propiedades de combustión y generación de energía es demasiado solicitada, así mismo cuenta con otras aplicaciones en diferentes sectores industriales y de limpieza.

Empezando por su eficacia en la disolución de sustancias no polares como lo son aceites, grasas y residuos de hidrocarburos debido a su baja polaridad, de este modo disuelve y eliminar eficientemente contaminantes lipófilos, así mismo, su facilidad de evaporación permite su aplicación en actividades que requieren de secado rápido sin dejar residuos significativos como la limpieza de maquinaria o piezas metálicas.

Una de las ventajas más fuertes que presenta el uso de la gasolina es su costo relativamente bajo en comparación con otros solventes, lo que lo hace accesible debido a su producción en grandes volúmenes en la industria petroquímica, del mismo modo es de fácil disponibilidad, es decir, es un solvente de fácil adquisición, (Speight, 2014) que en términos económicos su uso lo vuelve viable en aplicaciones de limpieza y desengrasado, aunque el término de sustentabilidad es nocivo para la salud y medio ambiente.

Aunque la gasolina tiene ventajas como solvente, su uso presenta desafíos y limitaciones, generando áreas de oportunidad para el desarrollo de alternativas o el uso de solventes menos dañinos para la salud y medio ambiente.

Una de sus limitantes es que contiene hidrocarburos aromáticos los cuales son altamente tóxicos y clasificados como carcinógenos (como el benceno), además de que la exposición prolongada de vapores de gasolina puede ocasionar daños neurológicos y respiratorios, por lo que existen oportunidades para desarrollar y promover el uso de solventes de baja toxicidad y con menor impacto ambiental, como el D-limoneno o solventes biodegradables de origen vegetal. Además de que la gasolina puede dañar ciertos materiales como algunos plásticos y recubrimientos, limitando su uso en la industria que requieren limpieza de componentes con materiales delicados. (Speight, 2014)

1.9 Limoneno

El D-limoneno es un compuesto orgánico natural clasificado como un monoterpeno cíclico, extraído de la cáscara de cítricos, principalmente utilizado como solvente el cual ha cobrado relevancia en aplicaciones industriales y ambientales debido a su origen renovable, con baja toxicidad y cuenta con la capacidad para disolver compuestos no polares.

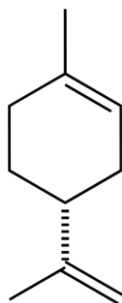


Ilustración 8. Estructura química del D-limoneno. De Benjah-bmm27derivative, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8634651>

Es un subproducto proveniente de la concentración de los aceites esenciales de naranja, limón, entre otros cítricos, convirtiéndolo en un solvente natural biodegradable de aroma agradable, clasificado como seguro y ecológico, (Rothstein-Gutiérrez, E., 2014) así mismo cuenta con propiedades físicas y químicas que lo vuelven un solvente no nocivo para el medio ambiente.

Densidad: aproximadamente de 0.84 g/cm³ a 20 °C, (Pavela et al., 2019) menos denso que el agua, facilitando su separación en mezclas heterogéneas.

Punto de ebullición: entre 154 °C a 163 °C, (Rothstein-Gutiérrez, E., 2014) adecuado para procesos que requieren evaporación controlada sin pérdidas significativas por volatilización rápida.

Viscosidad: cuenta con baja viscosidad de 1.3 Cp a 25 °C, (Pavela et al., 2019) permitiendo su fácil manejo y mezcla con otros solventes.

Estabilidad química: la ausencia de grupos funcionales polares en su estructura química lo vuelve una excelente capacidad para disolver compuestos orgánicos no polares, siendo químicamente estable bajo condiciones normales. Además de ser biodegradable, reduciendo su impacto al ambiente en comparación con solventes derivados del petróleo. (Rothstein-Gutiérrez, E., 2014)

El aceite esencial provee a diferentes sectores industriales, principalmente por ser proveedor de aromas a productos de limpieza, productos de uso hospitalario, así como insecticidas y desinfectantes, trayendo consigo ventajas en su uso y aplicación. (Rothstein-Gutiérrez, E., 2014)

Al ser de origen renovable, es un subproducto de la industria alimentaria, lo que lo hace sostenible y reduce la dependencia de fuentes derivadas del petróleo, ya que, en comparación con solventes petroquímicos como el benceno o el tolueno, el D-limoneno es menos tóxico para la salud, además de que su perfil toxicológico es aceptable para aplicaciones en limpieza industrial y formulaciones de productos de consumo. (Pavela et al., 2019) Así mismo, su rápida biodegradabilidad lo vuelve amigable con el medio ambiente, lo que lo convierte en una alternativa ecológica frente a los solventes convencionales.

Es un excelente solvente para grasas, aceites y polímeros, utilizado en la limpieza industrial, extracción de compuestos naturales (Rothstein-Gutiérrez, E., 2014) y en formulaciones de adhesivos, además de ser utilizado en desengrasantes, limpiadores y para la eliminación de residuos de adhesivos. (Pavela et al., 2019)

Aunque el D-limoneno presenta múltiples ventajas, existen áreas de oportunidad relacionadas con su investigación y desarrollo, algunas de estas áreas son:

Reducción de costos de producción: pese a ser una sustancia renovable, el costo adquisición puede ser más alto que el de solventes derivados del petróleo, esto debido a la dependencia de subproductos cítricos, por lo cual la optimización de los procesos de extracción y recuperación pueden hacer más competitiva su producción. (Rothstein-Gutiérrez, E., 2014)

Evaluación toxicológica: es menos tóxico que otros solventes, aun así, puede causar irritación dérmica, así como un sensibilizante conocido. Se pueden desarrollar alternativas para reducir este efecto en formulaciones de productos de cuidado personal. (Pavela et al., 2019)

Reducción de impacto ambiental: su producción a gran escala podría generar preocupaciones sobre la sostenibilidad de los cultivos de cítricos debido a la alta demanda, aunado al hecho de que para su extracción es necesario el intercambio de calor, requiriendo grandes cantidades de energía.

Nuevas tecnologías: su naturaleza no polar podría explorarse en áreas como la fabricación de polímeros biodegradables, donde podría actuar como medio solvente.

1.10 Funcionamiento de recubrimientos impermeabilizantes a base de EPS

Los recubrimientos impermeabilizantes a base de EPS se elaboran disolviendo el EPS en un solvente adecuado, como la gasolina o el D-limoneno, en donde la mezcla resultante se aplica como un recubrimiento sobre las superficies que se desean impermeabilizar.

Al secarse, el solvente se evapora y el EPS forma una película continua sobre la superficie, denominada como una barrera impermeable que evita el paso de la humedad y de acuerdo con su estructura celular cerrada, contribuye a la impermeabilidad del recubrimiento, así mismo existen ventajas de los recubrimientos a base de EPS más allá de su impermeabilidad, algunas son:

- Adhesión: suelen tener una buena adherencia a diversos tipos de superficies, como el concreto, el metal y la madera.
- Flexibilidad: la película de EPS es flexible, lo que permite que se adapte a superficies irregulares, con la posibilidad de que se expanda y contraiga con los cambios de temperatura. (López, D., 2014)
- Aislamiento térmico: del mismo modo que el EPS en estado sólido, los recubrimientos a base de EPS ofrecen un cierto grado de aislamiento térmico.
- Ligereza: son ligeros, facilitando su aplicación y reduciendo la carga estructural. (López, D., 2014)

Los recubrimientos impermeabilizantes a base de EPS cuentan diversas aplicaciones, entre las que destacan la protección para techos contra las filtraciones de agua, la creación de superficies impermeables en terrazas y balcones, así como la impermeabilización de sótanos, túneles y otras estructuras enterradas y brindar protección del hormigón armado contra la humedad y los agentes corrosivos. (López, D., 2014)

A pesar de sus múltiples ventajas, los recubrimientos a base de EPS presentan algunos desafíos y limitaciones, como:

- Vulnerabilidad a los rayos UV: su exposición prolongada a los rayos ultravioleta puede degradar el EPS, afectando su durabilidad y propiedades impermeabilizantes. (Poletto. M, 2011)
- Inflamabilidad: es un material combustible, por lo que es necesario tomar precauciones durante su aplicación y almacenamiento.

Para mitigar los impactos ambientales asociados al uso de solventes como la gasolina, se han desarrollado alternativas más sostenibles, como el uso de solventes naturales como el D-limoneno, que se obtiene de la cáscara de cítricos. Además, se están investigando otras alternativas, como el uso de polímeros biodegradables o la incorporación de aditivos que mejoren la durabilidad y la resistencia a los rayos UV de los recubrimientos a base de EPS.

Los recubrimientos impermeabilizantes a base de EPS ofrecen una solución efectiva para proteger las superficies de la humedad. Sin embargo, es importante considerar sus limitaciones y buscar alternativas más sostenibles para minimizar su impacto ambiental.

1.11 Normativas aplicables para recubrimientos impermeables

Las normas establecen lineamientos y reglas que regulan el comportamiento y ejecución de ciertas actividad o pruebas en distintos ámbitos con el fin de garantizar la seguridad y eficiencia de las actividades. De acuerdo con la Organización Internacional de Normalización, ISO (2025), las normas representan los conocimientos de las personas expertas en su materia y que conocen las necesidades de las empresas a las que representan. La Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, ASTM (2025), comprende que las normas ayudan a las empresas a mejorar la calidad y competitividad, al tiempo que mejoran cada día la vida de millones de personas en todo el mundo.

En términos de protección al medio ambiente, regulan las emisiones de gases contaminantes y el manejo de residuos industriales con el fin de minimizar el

impacto ambiental, también establecen criterios que regulan diversos sectores dentro de la industria que contribuyen al desarrollo sostenible, algunas son establecidas por la *EPA (Environmental Protection Agency)* y el *Protocolo de Kioto*.

En términos de calidad y estandarización de un proceso, producto o servicio existen normas que garantizan la uniformidad, facilitando la producción en masa y compatibilidad entre distintos sistemas establecidas por la *ISO (International Organization for Standardization)* y la *ASTM (American Society for Testing and Material)*, que en algunos casos ambas entidades pueden generar una norma para el mismo procedimiento bajo consideraciones similares, pero no iguales.

Existen normas creadas específicamente para la elaboración y aplicación de los recubrimientos impermeabilizantes a base de solventes orgánicos aplicados sobre diferentes sustratos (superficie de aplicación), validando las diferentes características de interés que debe de contar el producto.

Tabla 1. Normas aplicables a recubrimientos impermeabilizantes a base de solventes orgánicos.

Terminología y referencia de datos	Propiedades fisicoquímicas	Propiedades mecánicas
<ul style="list-style-type: none"> • ISO-4618-2023 (Paints and varnishes - Vocabulary) • ASTM D823 (Producing Films of Uniform Thickness of paints, varnish and related products) • ASTM-D3924-16-2019 (Conditioning and Testing Paint, Varnish, Lacquer, 	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM-D1200-23 (Viscosity by Ford Viscosity Cup) • ASTM-D1475-13 (Density of Liquid Coatings) • ASTM-D2369-20 (Volatile Content of Coatings) • ISO-3251-2019 (Determination of non-volatile-matter) 	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM-D1640-D1640M-14-2022- (Drying, Curing, or Film Formation) • ASTM-D3359-23 (Rating Adhesion by Tape Test) • ASTM-D3363-22 (Film Hardness by Pencil Test)

<p>and Related Materials)</p> <ul style="list-style-type: none"> • nmx-u-001-scfi-2011 (RECUBRIMIENTOS, PINTURAS, BARNICES Y PRODUCTOS AFINES – TÉRMINOS Y DEFINICIONES) • ASTM-C578-01 (Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation) 	<ul style="list-style-type: none"> • METHOD 24- DETERMINATION OF VOLATILE MATTER CONTENT 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-2409-2020 (Cross-cut test) • ISO-2808-2019 (Determination of film thickness) • ISO-15184-2020 (Determination of film hardness by pencil test)
--	---	---

Capítulo 2: Metodología

El recubrimiento impermeabilizante se elaborará mediante la disolución de residuos de poliestireno expandido (perla contaminada y polvo), previamente recolectados en determinadas plantas petroquímicas ubicadas en el estado de Tlaxcala, México. Estos residuos se generan durante el proceso de fabricación de extruidos de EPS a partir de perlas de estireno, que serán expuestos a diferentes concentraciones de soluto, tiempo de mezclado y revoluciones por minuto en solventes (D-limoneno y gasolina) mediante métodos científicos similares a investigaciones previas como lo proponen Arriola (2013), López (2014), Díaz (2017) y Mendoza (2001).

2.1 Pretratamiento de residuos de poliestireno expandido

Para asegurar la correcta disolución de los residuos de poliestireno expandido (perla contaminada y polvo) en los solventes, y así obtener la mayor cantidad de poliestireno disuelto, fue necesario garantizar que los residuos se encontraran libres de cualquier contaminante orgánico o inorgánico, tales como hojas, pasto, tierra, piedras, insectos o cualquier otro elemento ajeno al poliestireno. Esto se consiguió utilizando un proceso de reducción de partícula, denominado tamizado simple, el cual resultó eficaz para garantizar la ausencia de algún contaminante.



Ilustración 9. Materia prima

2.2 Determinación de solvente y condiciones de mezcla

2.2.1 Selección de solvente

Para llevar a cabo la selección del solvente adecuado, de acuerdo con los objetivos de la investigación, se evaluó la accesibilidad y la facilidad de manipulación de las

sustancias. A partir de estos criterios, se seleccionaron cuatro solventes, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 2. Identificación de solvente adecuado

	Xileno	D-limoneno	Gasolina	Acetato de etilo
Costo	Alto	Moderado a alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad	Media	Media	Alta	Alta
Toxicidad	Moderada (efectos en el sistema nervioso y hepático)	Baja (seguro con precauciones básicas)	Alta (peligroso por inhalación y contacto prolongado)	Moderada (irritación respiratoria y dérmica)
Volatilidad	Moderada (punto de ebullición 138-144 °C)	Baja (punto de ebullición 175°C)	Alta (punto de ebullición 30-200°C)	Alta (punto de ebullición 77 °C)

De acuerdo con los resultados obtenidos, expresados en la tabla 2, el solvente que mejor se ajustó a los objetivos fue el D-limoneno, un compuesto terpénico presente en la cáscara de diversas frutas, lo que sugiere un impacto ambiental significativamente reducido debido a su origen natural y baja toxicidad.

Adicionalmente, se identificó que la gasolina representa la segunda opción más viable. Principalmente por su alta accesibilidad comercial, ya que puede adquirirse con facilidad en cualquier estación de servicio, así como por su costo relativamente bajo por litro en comparación con los demás solventes evaluados. No obstante, a pesar de ser una sustancia tóxica y del impacto ambiental negativo asociado a su uso, la gasolina es una mezcla compleja de hidrocarburos que ha sido utilizada como solvente en investigaciones previas, lo que respalda su viabilidad técnica bajo ciertas condiciones controladas.

En virtud de lo anterior, las pruebas con gasolina se realizaron conforme a las disposiciones establecidas en distintas Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que regulan el manejo seguro de sustancias inflamables y peligrosas:

- La NOM-002-STPS-2010 es sobre la prevención y protección contra incendios, lo que llevó a la selección de un laboratorio que contara con rutas de evacuación próximas, con sistemas de control de vapores y alejado de fuentes de ignición.
- La NOM-005-STPS-1998 es sobre las condiciones de seguridad e higiene para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas inflamables o combustibles, así como sustancias explosivas (en espacios abiertos y cerrados), utilizando en todo momento vestimenta que no pueda generar chispa o temperaturas que puedan provocar ignición, además de identificar las zonas aisladas de fuentes de calor e ignición dentro del laboratorio en donde se pueda colocar la gasolina.
- La NOM-018-STPS-2015 es sobre el sistema armonizado de clasificación e identificación de sustancias químicas peligrosas (GHS), por lo que se requirió de la hoja de seguridad de la gasolina (*Hoja de datos de seguridad, Gasolinas Pemex Premium y Pemex Magna, Num. Versión 2.1, 09.10.2015*) en donde se refiere a la gasolina como inflamable y nocivo para la salud (Ilustración 10).

Elementos de las etiquetas del SAC
Pictograma



Palabra de advertencia : Peligro

Ilustración 10. Pictogramas de la gasolina (Hoja de datos de seguridad, Gasolinas Pemex Premium y Pemex Magna, Num. Versión 2.1, 09.10.2015)

2.2.2 Condiciones de mezclado

Se utilizó como referencia el porcentaje en peso de los residuos de poliestireno expandido, con la finalidad de facilitar la obtención de las proporciones soluto-

solvente, expresadas en gramos y mililitros, respectivamente. Para ello, se consideró un volumen total (v_T) de 250 ml como base de preparación de las soluciones.

A continuación, se muestra el sistema de ecuaciones que desarrollado para obtener las proporciones respecto al porcentaje en peso:

$$v_T = v_E + v_S \quad ; Ec 1$$

$$250 = v_E + v_S \quad ; Ec 2$$

v_T = volumen total de la mezcla (ml)

v_E = volumen del residuo de poliestireno expandido (ml)

v_S = volumen del solvente (D-limoneno, gasolina) (ml)

$$m_T = m_E + m_S \quad ; Ec 3$$

$$m_S = \rho_S v_S \quad ; Ec 4$$

$$m_E = \rho_E v_E \quad ; Ec 5$$

$$m_T = \rho_E v_E + \rho_S v_S \quad ; Ec 6$$

$$\frac{m_E}{m_T} = \% \text{ en peso de residuo de EPS} \quad ; Ec 7$$

m_T = masa total de la mezcla (g)

m_E = masa del residuo de poliestireno expandido (g)

m_S = masa del solvente (D-limoneno, gasolina) (g).

ρ_E = densidad del poliestireno expandido (g/ml)

ρ_S = densidad del solvente (D-limoneno, gasolina) (g/ml)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la resolución del sistema de ecuaciones. Se tomaron en cuenta proporciones entre el 5 % y el 20 % en peso de residuos de poliestireno expandido, debido a que en proporciones mayores al 20% en peso de poliestireno expandido se presentan limitantes físicas de disolución.

Tabla 3. Porcentaje en peso de EPS y Gasolina

% de EPS	v_E (ml)	v_S (ml)	m_E (g)	m_S (g)	m_T (g)
----------	------------	------------	-----------	-----------	-----------

5	10.57	239.42	9.57	181.96	191.54
10	21.31	228.68	19.31	173.8	193.11
15	32.23	217.76	29.2	165.5	194.7
20	43.33	206.66	39.26	157.06	196.32

Tabla 4. Porcentaje en peso de EPS y D-limoneno

% de EPS	v _E (ml)	v _S (ml)	m _E (g)	m _S (g)	m _T (g)
5	11.64	238.35	10.55	200.45	211
10	23.37	226.62	21.17	190.59	211.76
15	35.18	214.81	31.88	180.65	212.53
20	47.08	202.91	42.66	170.64	213.31

Las pruebas se realizaron tanto dentro como fuera del laboratorio, manteniendo en ambos casos condiciones controladas de temperatura y velocidad de mezclado.

La necesidad de efectuar parte de las pruebas en exteriores respondió a limitaciones físicas relacionadas con el mezclado del solvente y los residuos de poliestireno expandido, así como a la falta de equipo adecuado dentro del laboratorio que garantizara la correcta ejecución del procedimiento.

Para las pruebas dentro del laboratorio se utilizaron vasos de precipitado de 100 ml y 250 ml, una parrilla THERMO FISHER SCIENTIFIC Cimarec digital de cerámica eléctrica con una capacidad máxima de 1200 rpm, un agitador de vidrio y un agitador magnético. Las condiciones experimentales fueron: temperatura ambiente (20°C), agitación (1200 rpm) en un periodo de 30 minutos y en cumplimiento de lo establecido en las normas NOM-002-STPS-2010, NOM-005-STPS-1998, NOM-018-STPS-2015.



Ilustración 11. Parrilla eléctrica.

Para la realización de las pruebas en exteriores se emplearon diversos materiales, entre ellos recipientes plásticos de 1 litro y un taladro de percusión VVR de 13 mm (1/2 pulgada) de la marca Ryobi, seleccionado por su capacidad de alcanzar una velocidad máxima de 3000 rpm.

Para garantizar que la mezcla se realizara de forma uniforme, se elaboró un mezclador improvisado, diseñado con una broca de 30 cm a la que se fijaron, mediante tornillos, dos piezas de lámina de aluminio dispuestas en el extremo.

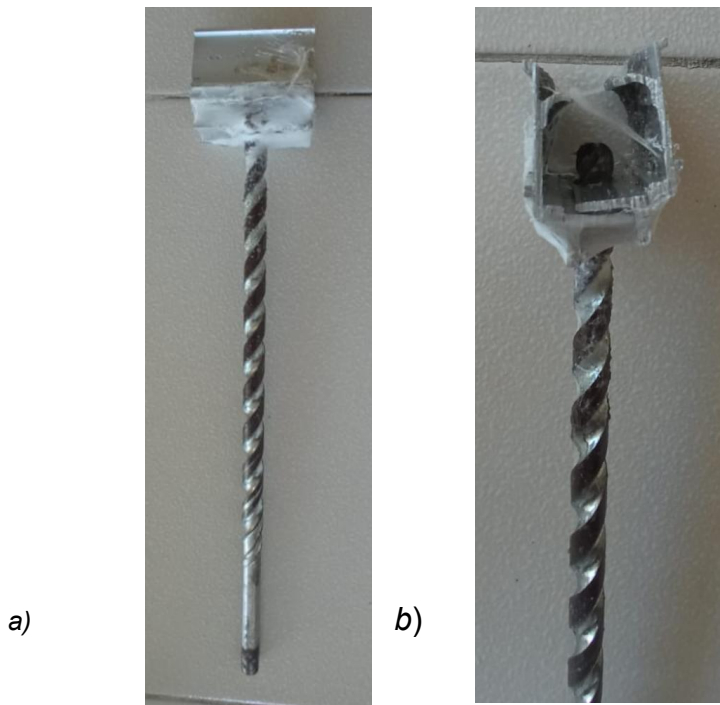


Ilustración 12. mezclador casero. 12a), 12b).

Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente (23°C), bajo agitación constante (3000 rpm) durante un periodo de 60 minutos, en cumplimiento con lo dispuesto en las normas NOM-002-STPS-2010, NOM-005-STPS-1998, NOM-018-STPS-2015, descritas previamente en este documento.

La finalidad de las pruebas anteriormente descritas fue obtener mezclas homogéneas y distinguir cada muestra según su porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido. Para ello, se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos que permitieron evaluar propiedades como la viscosidad, la densidad y el contenido de sólidos disueltos, así como análisis mecánicos orientados a determinar el grosor de la película, su adherencia al sustrato, el tiempo de secado y su dureza.



Ilustración 13. Recipientes de plástico de 1L.

2.2.3 Pruebas de viscosidad

La primera prueba realizada fue la determinación de la viscosidad, para la cual se emplearon dos métodos distintos. El primero fue el método ASTM-D1200, (*Método de ensayo estándar para la viscosidad mediante la copa de viscosidad Ford*), y el segundo, un método empírico que consistió en observar el tiempo de escurrimiento de un líquido adherido a un lápiz. El objetivo fue obtener un rango más amplio de datos experimentales que permitiera su comparación.

Aunque el método de escurrimiento no cuenta con un estándar establecido, ambos métodos se basaron en el mismo principio: medir la viscosidad en función del tiempo que transcurre hasta que se forma la primera gota de escurrimiento.

Para el método *de ensayo estándar para la viscosidad mediante la copa de viscosidad Ford*, se estableció que las pruebas debían realizarse a una temperatura

de 25 °C ($\pm 0.2^\circ\text{C}$). Además, la mezcla debía agitarse durante 10 minutos antes de la prueba y reposar otros 10 minutos antes de realizar la medición.

A continuación, se eligió la Copa Ford N° 4, la cual se llenó hasta el borde y se le quitó el excedente con una regla, al mismo tiempo el orificio inferior se mantuvo sellado para impedir que se vaciara.



Ilustración 14. Copa Ford N° 4.

Una vez que la copa estuvo llena, se midió con un cronómetro el tiempo, en segundos, desde que se retiró el sello en el orificio inferior, permitiendo el flujo de la mezcla hasta que se observó la primera interrupción en la corriente, momento que marcó la finalización de la prueba.

La norma establece que, para la Copa Ford N° 4, debe aplicarse una fórmula específica mediante la cual los resultados se obtienen en centistoke (cSt), unidad de viscosidad cinemática expresada en mm^2/s .

$$V_4 = 3.85 (t - 4.49) ; Ec 8$$

V_4 = viscosidad cinemática (cSt)

t = tiempo (s)

Para la medición de la viscosidad, basada en el tiempo de escurrimiento de un líquido adherido a un lápiz, se utilizó un recipiente con las dimensiones adecuadas que permitieran introducir un cuerpo cilíndrico (en este caso, un lápiz), así como un cronómetro. Acto seguido, se midió el tiempo, en segundos, desde el momento en

el que se retiró el lápiz de la mezcla hasta que se observó la primera interrupción en la corriente, lo cual marcó el final de la prueba. Posteriormente, el tiempo registrado se sustituyó en la fórmula empírica:

$$v = (m * t) + b ; Ec 9$$

v = viscosidad cinemática (cSt)

m = masa (g)

t = tiempo (s)

b = 0

2.2.4 Pruebas de densidad

En la fase siguiente, la densidad se determinó mediante el método establecido en la norma ASTM D1475-13 (*Método de ensayo estándar para la densidad de recubrimientos líquidos, tintas y productos relacionados*), la cual está diseñada específicamente para recubrimientos impermeabilizantes.

La norma establece que la mezcla debe mantenerse a una temperatura de 25 °C, condición que se logró mediante un baño maría durante 10 minutos. Se tomó en cuenta que las sustancias con alta viscosidad pueden contener burbujas de aire atrapadas en la mezcla, lo cual puede generar falsos positivos durante la prueba; por ello, se verificó que ninguna muestra presentara burbujas de aire.

Los materiales utilizados fueron: un matraz Erlenmeyer de 50 ml con tapón de vidrio aforado, una balanza analítica, un termómetro y una tina de agua para mantener la temperatura a 25°C.

Se utilizó la fórmula establecida por la norma, obteniendo la densidad en g /ml:

$$D_m = \frac{W - w}{V} ; Ec 10$$

D_m = densidad (g/ml)

V = volumen del contenedor (ml)

W = peso del contenedor lleno (g)

w = peso del contenedor vacío (g)

2.2.5 Prueba de contenido volátil (sólidos disueltos)

Además, la determinación del porcentaje en peso de contenido volátil orgánico y el porcentaje en peso de sólidos en la mezcla (materia no volátil), se realizó conforme a lo estipulado en la norma ASTM D2369 –20 (*Método de ensayo estándar para el contenido volátil de recubrimientos*).

De acuerdo con la norma antes mencionada, la prueba debe realizarse a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; por consiguiente, fue utilizado un horno capaz de poder recrear dichas condiciones. Adicionalmente, se emplearon una balanza analítica y papel aluminio para fabricar charolas con dimensiones de 58 mm x 58 mm y 18 mm de alto.

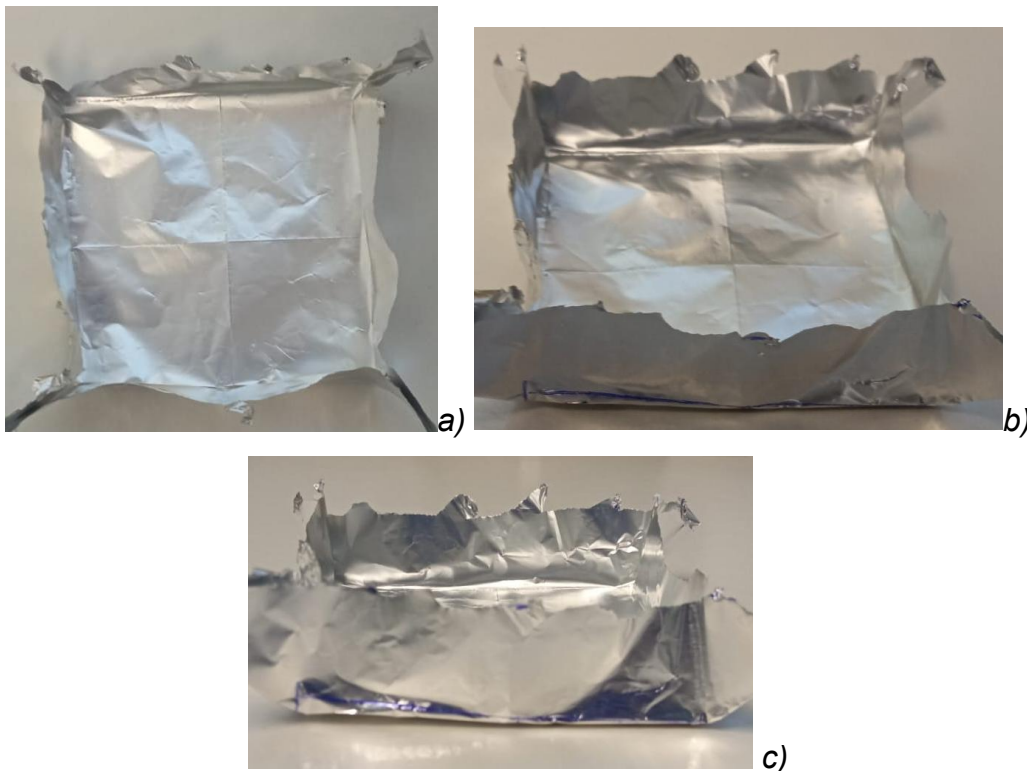


Ilustración 15. Charolas de aluminio. 15a), 15b), 15c).

Se elaboraron dos charolas por cada muestra, en cumplimiento de lo establecido por la norma, con el objetivo de obtener un promedio por muestra y reducir las desviaciones. En cada charola se depositaron $3\text{ ml} \pm 1\text{ ml}$ de la mezcla, conforme a la tabla proporcionada por la norma ASTM D2369–20, y posteriormente se colocaron en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 60 minutos.

Además, se utilizaron las fórmulas que establece la norma:

$$V_A = \left[\left(\frac{W_2 - W_1}{S_A} \right) 100 \right] ; Ec 11$$

$$V = \frac{V_A + V_B}{2} ; Ec 12$$

V_A = % en peso de contenido volátil orgánico

W_1 = peso de la charola (g)

W_2 = peso de la charola con la mezcla después de calentado (g)

S_A = peso de la mezcla (g)

V_B = % en peso de contenido volátil orgánico duplicado

$$N = \frac{N_A + N_B}{2} ; Ec 13$$

$$N_A = 100 - V_A ; Ec 14$$

$$N_B = 100 - V_B ; Ec 15$$

N = % en peso de sólidos en una mezcla (materia no volátil)

2.3 Aplicación del recubrimiento impermeabilizante en techo

Para continuar, uno de los pasos más importantes para verificar que el proceso de elaboración del recubrimiento impermeabilizante cumpliera con las propiedades de interés para el usuario fue su aplicación sobre un techo.

Se utilizó un volumen total de 10 L con una concentración del 15 % en peso de residuo de poliestireno expandido. Esto implicó el uso de 8,710.55 ml gasolina y 1,168.23 g de residuo de poliestireno expandido (perla contaminada).

Posteriormente, la mezcla preparó utilizando un taladro/desatornillador de percusión VVR de 13 mm (1/2 Pulgada) de la marca Ryobi, capaz de alcanzar una velocidad de 3, 000 RPM. Este fue el mismo modelo que se utilizó para la elaboración de las muestras fuera del laboratorio.

Además, considerando el volumen de la mezcla y en concordancia con los alcances y limitaciones de la investigación principalmente la prioridad de emplear un mezclador de bajo costo para el usuario, se evaluaron mezcladores más grandes y

resistentes en comparación con el que fue improvisado previamente. El mezclador de acero WARNER (Ilustración 16a) resultó ser la opción más económica.

Tabla 5. Identificación de mezclador adecuado

Criterio	Mezclador de acero WARNER	Mezclador de pintura cuadrado tipo C	Mezclador para compuestos WARNER	Mezclador eléctrico Rubimix 9N RUBI	Mezclador de pintura
Material de construcción	Acero resistente a la corrosión	Acero	Acero para alta viscosidad	Acero y plástico reforzado	Metales básicos y plástico
Uso	Pinturas líquidas y densas	Pinturas y barnices	Compuestos espesos y pinturas densas	Pinturas, compuestos y morteros	Pinturas de baja densidad
Diseño de cabezal	Hélice en espiral	Forma cuadrada	Hélice con refuerzo	Hélice multidireccional	Paleta simple
Modo de operación	Manual o con rotomartillo	Manual o con rotomartillo	Manual o con rotomartillo	Manual o con rotomartillo	Manual o con rotomartillo
Eficiencia de la mezcla	Alta para líquidos densos	Media para líquidos	Alta para compuestos espesos	Muy alta	Baja
Peso	Ligero (0.5-1 kg)	Moderado (1-1.5 kg)	Ligero (0.5-1 kg)	Pesado (3-4 kg)	Muy ligero (>0.5 kg)
Compatibilidad con rotomartillos	Si	Si	Si	No	Si

Velocidad ajustable	Si	No	Si	Si (control eléctrico)	Si
Costo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Muy bajo
Durabilidad	Alta	Moderada	Alta	Muy Alta	Baja
Ventajas	Resistente, económico, fácil de usar	Diseño compacto y económico	Ideal para mezclas densas	Eficiencia y versatilidad en múltiples aplicaciones	Bajo costo y portabilidad
Limitaciones	Requiere herramientas adicionales	No apto para compuestos densos	Requiere rotomartillo	Costo elevado, requiere de fuente eléctrica	Baja eficiencia en mezclas complejas



a)



b)



c)



d)



e)

Ilustración 16. Mezcladores. Mezclador de acero WARNER 16a), Mezclador de pintura cuadrado 16b), Mezclador para compuestos WARNER 16c), Mezclador eléctrico Rubimix 9N RUBI 16d), Mezclador de pintura 16e).

Para realizar la mezcla, se empleó el mezclador de acero de la marca WARNER, dentro de una cubeta de plástico de 30 L, a una velocidad de 3,000 rpm. Se cumplió

con la condición de mantener el poliestireno expandido y el solvente en constante movimiento, evitando su apelmazamiento y asegurando que, al disolverse, permanecieran en estado líquido como una mezcla homogénea. Por esta razón, la materia prima se agregó de forma gradual, durante cinco minutos, como se puede observar en las ilustraciones a continuación.



Ilustración 17. Inicio de la agitación.

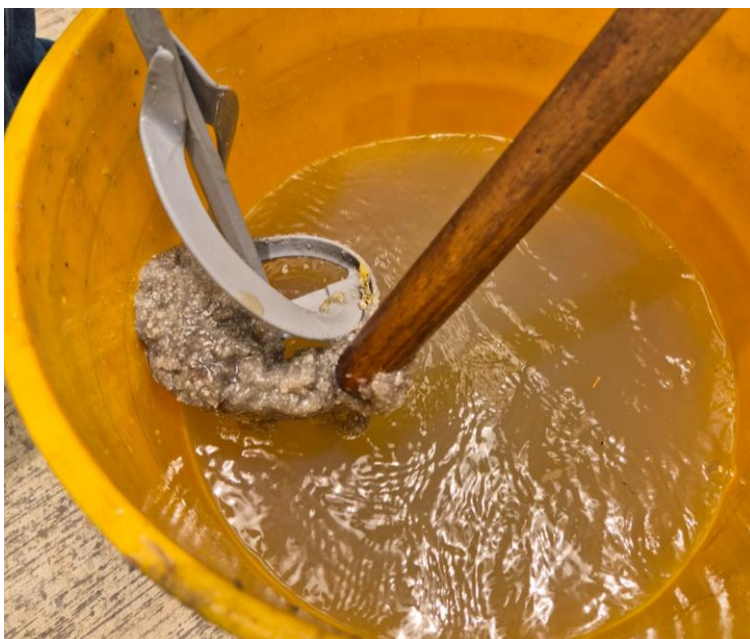


Ilustración 18. 5.5 minutos de agitación.



Ilustración 19. 10 minutos de agitación.



Ilustración 20. 15 minutos de agitación.

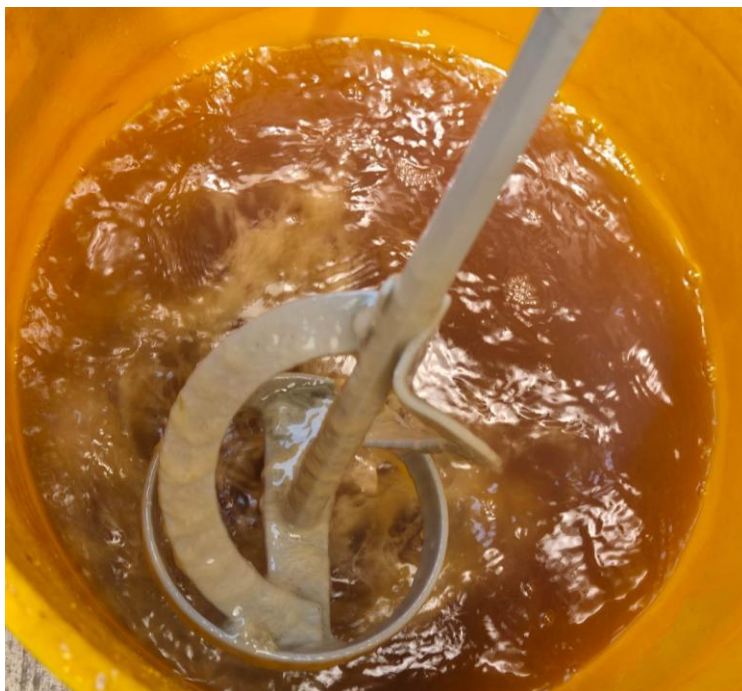


Ilustración 21.20 minutos de agitación.

Adicionalmente, el contenedor en el que se realizó la mezcla no contaba con una tapa o protección que evitara la liberación de gases provenientes de la gasolina, ni de material sólido o líquido hacia el entorno. Por esta razón, y con el objetivo de priorizar la seguridad de todos los involucrados, el procedimiento se llevó a cabo completamente al aire libre, bajo sombra y en cumplimiento de las normas NOM-002-STPS-2010, NOM-005-STPS-1998 y NOM-018-STPS-2015.

Para la selección del techo se priorizaron tres condiciones: la primera, que no contara con impermeabilizante, y que tuviera cemento expuesto; la segunda, que tuviera impermeabilizante rojo aplicado con no más de un mes de antelación; y la tercera, que presentara con impermeabilizante rojo aplicado con signos de desgaste. Estas tres variantes fueron seleccionadas por representar las condiciones más comunes en los techos de las viviendas ubicadas en la zona metropolitana de la ciudad de Puebla.

A continuación, se presenta una tabla que contiene las características de los techos que considerados para la realización de las pruebas.

Tabla 6. Identificación de techumbre adecuado

Criterio	Techo sin impermeabilizante con cemento expuesto	Techo con impermeabilizante rojo aplicado en menos de un mes	Techo con impermeabilizante rojo aplicado con desgaste
Condición superficial	Rugosidad y porosidad elevada	Superficie homogénea, sin grietas	Desgaste, grietas o decoloración presentes
Adherencia esperada del EPS	Teniendo mayor porosidad, mejorando la adhesión	La superficie uniforme, facilita una aplicación óptima	El desgaste podría comprometer la adherencia
Requerimientos de preparación previa	Limpieza profunda, resanes y nivelación	Limpieza ligera y verificación de integridad	Limpieza, resanes y reforzamiento previo
Durabilidad de EPS esperada	Protege la base de cemento contra el deterioro	Refuerzo adicional para el impermeabilizante reciente	Riesgo de fallas por la base deteriorada
Riesgo de fisuras posteriores	Base rígida sin protección previa puede generar fisuras	Impermeabilizante existente actúa como capa de transición	El desgaste previo puede generar puntos débiles
Eficiencia térmica tras aplicación de EPS	Alta: cemento y EPS juntos ofrecen buen aislamiento	Muy alta: capa doble (impermeabilizante + EPS) mejorando el rendimiento	Moderada: pérdida de eficiencia por deterioro por el deterioro de la base

Resistencia a las condiciones ambientales	Media: cemento expuesto es resistente pero vulnerable a la erosión	Alta: protege bien contra impactos menores	Media: pierde efectividad contra impactos
Probabilidad de hongos o moho	Alta: acumulación de agua favorece el crecimiento	Baja: impermeabilizante reduce el contacto con la humedad	Moderada: el desgaste permite la filtración de agua

La primera condición evaluada fue la del techo sin impermeabilizante, compuesto únicamente por cemento expuesto. Aunque se consideró una opción razonable, requirió modificaciones adicionales, como la reparación de grietas y la mejora de su nivelación. No obstante, su alta porosidad fue un factor clave para asegurar una buena adherencia del EPS.

Por otra parte, el techo con impermeabilizante rojo aplicado con menos de un mes de antigüedad resultó ser la mejor opción, ya que la superficie era homogénea y no requirió modificaciones, lo cual favoreció una mayor durabilidad del recubrimiento.

Por último, se evaluó el techo con impermeabilizante rojo en estado de desgaste. Esta opción fue considerada aceptable, aunque también necesitó modificaciones previas para asegurar la correcta adherencia del recubrimiento y evitar futuros problemas estructurales, al igual que la primera condición.

En consecuencia, y considerando todos los factores y opciones disponibles, se descartó el techo sin impermeabilizante con cemento expuesto, ya que el propósito de la investigación era observar el comportamiento del recubrimiento a base de residuos de poliestireno expandido tanto en superficie con impermeabilizante como en una que no lo tuviera. Por lo tanto, se determinó que, para cumplir este criterio, sería necesario realizar un gasto adicional para impermeabilizar una parte del techo.

Del mismo modo, el techo que inicialmente parecía el mejor candidato, aquel con impermeabilizante rojo aplicado con menos de un mes de antigüedad, también fue

descartado, ya que implicaba retirar un recubrimiento prácticamente nuevo y en buen estado, lo cual requería tiempo adicional para preparar adecuadamente el área de aplicación.

Por consiguiente, el mejor candidato para realizar las pruebas de aplicación y monitoreo fue el techo con impermeabilizante rojo en estado de desgaste. Su condición permitió identificar fácilmente zonas con mayor deterioro y/o ausencia del recubrimiento, lo cual facilitó la remoción de la poca cantidad de material restante, definiendo así un área de estudio sin impermeabilizante. De igual forma, estas condiciones posibilitaron ubicar una zona de desgaste y desprendimiento, permitiendo contrastar el comportamiento del recubrimiento aplicado en distintas superficies.

Se seleccionó la zona de Bosques de Amalucan, con código postal 72310, en la ciudad de Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla, ya que cumplía con la mayoría de las condiciones requeridas. Adicionalmente, el fácil acceso a la propiedad, que cuenta con un área de 24.93 m² para poder realizar la aplicación del recubrimiento impermeabilizante, fue factor determinante en la elección.

Para iniciar la preparación de la superficie destinada a la aplicación del recubrimiento impermeabilizante, esta se dividió en tres secciones, como se muestra en el siguiente diagrama:

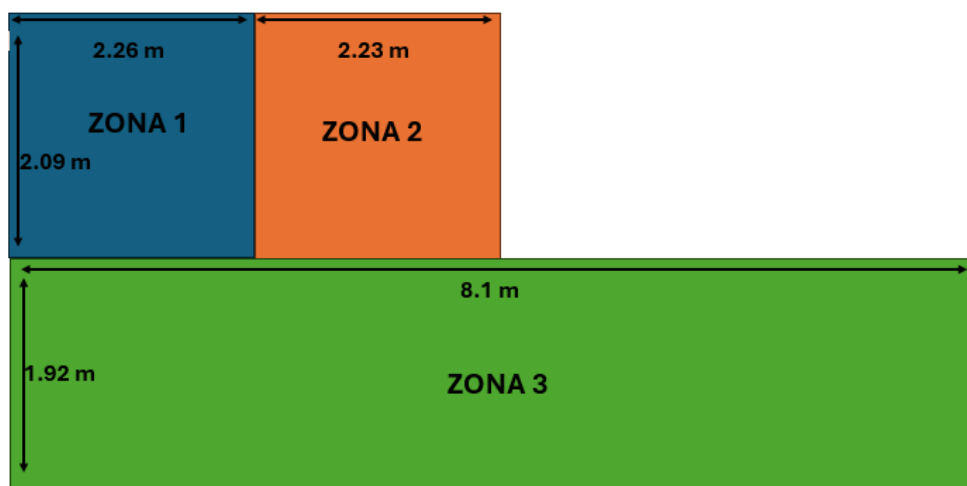


Ilustración 22. Diagrama de partes por recubrir con sus dimensiones.

Dicha superficie se encuentra segmentada en tres partes:

- Zona de prueba de control “Zona 1”: se estableció como zona de control, en la cual se retiró completamente el impermeabilizante rojo presente en el área, así como cualquier tipo de contaminante. Esta sección cuenta con dimensiones de 2.26 m de largo por 2.09 m de ancho, lo que equivale a una superficie de 4.72 m². Para la limpiar el área en la cual se trabajó, se levantó el impermeabilizante rojo con ayuda de una pala y una escoba.



Ilustración 23. Techumbre antes.



Ilustración 24. Techumbre antes.

- “Zona 2”: en este caso, no se realizó ninguna limpieza más allá de la remoción de polvo u otros contaminantes sólidos que pudieran interferir con la aplicación uniforme del impermeabilizante. Del mismo modo, no se retiró el impermeabilizante rojo previamente presente en el techo. Cabe señalar

que esta área contaba con una superficie de 2.23 m de largo por 2.09 m de ancho, lo que equivale a 4.66 m².

- “Zona 3”: esta fue la zona más extensa de las tres y se trabajó al final, debido a la distribución del espacio en el techo de la vivienda. Al igual que en la zona anterior, no se realizó limpieza alguna, más allá de remover polvo o cualquier otro contaminante sólido que pudiera interferir con la aplicación uniforme del impermeabilizante, como se puede observar en las siguientes ilustraciones. Tampoco se retiró el impermeabilizante rojo previamente presente en el área, la cual contaba con dimensiones de 8.10 m de largo por 1.92 m de ancho, equivalentes a una superficie de 15.55 m².



Ilustración 25. Limpieza de techumbre.



Ilustración 26. Limpieza de techumbre.



Ilustración 27. Limpieza de techumbre.

2.4 Validación de la operación de sellado

Además de las pruebas fisicoquímicas y su aplicación en techo, se observó el comportamiento del recubrimiento impermeabilizante durante su interacción con diversos sustratos, como cemento, ladrillo y PVC, utilizando una superficie de aplicación reducida. El seguimiento se realizó durante un mes, periodo considerado adecuado para permitir la evaporación total de la gasolina y, a su vez, observar posibles cambios físicos derivados de su exposición prolongada al sol. Se evaluaron propiedades como el color, el olor y el desgaste.

2.4.1 Grosor de la película húmeda

La primera prueba realizada tras la aplicación de la mezcla fue la obtención del grosor de la película húmeda, utilizando el método de implementación de la norma ISO 2802, *Pinturas y barnices — Determinación del grosor de la película*. Esta prueba permitió observar el comportamiento de la mezcla homogénea en función con la cantidad en porcentaje en peso de residuos de poliestireno expandido.

Para su ejecución se empleó un medidor de espesor para pintura húmeda con un rango de 25 a 2000 micras, el cual se puede muestra en la siguiente ilustración.



Ilustración 28. Medidor de espesor.

La película de recubrimiento se aplicó sobre la superficie del sustrato (cemento, ladrillo y PVC) en posición horizontal, e inmediatamente se colocó el medidor de espesor, asegurando que los dientes laterales estuvieran firmemente apoyados sobre la superficie. Se esperó unos segundos para permitir que la película marcara la micra correspondiente.

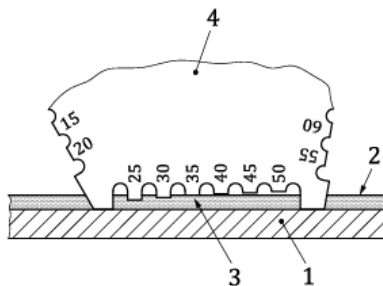


Ilustración 29. Example of comb gauge. ISO (2019). ISO 2808, Paints and varnishes-Determination of film thickness. Fifth edition 2019-07

2.4.2 Tiempo de secado

Una de las condiciones más importantes en la aplicación de un recubrimiento impermeabilizante es el tiempo de secado. Para su determinación, se empleó el método establecido en la norma ASTM-D1640-14-2022, *Métodos de prueba estándar para el secado, curado o formación de películas de recubrimientos*

orgánicos, el cual permite verificar que la película aplicada esté completamente seca, sin necesidad de utilizar equipos sofisticados.

Las pruebas se realizaron en laboratorio, a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. El impermeabilizante se aplicó sobre distintos sustratos (cemento, ladrillo y PVC), y se cronometró el tiempo que transcurrió hasta que la película aparentó estar seca. A continuación, para confirmar que la película ya estuviera seca, se colocó el dedo índice sobre la superficie de la película sin aplicar presión. Se consideró que la película estaba seca si mostraba una consistencia pegajosa, pero no se adhería al dedo.

2.4.3 Prueba de adhesión

Para la prueba de adherencia de la película sobre distintos sustratos (cemento, ladrillo y PVC), se empleó el método establecido en la norma ASTM-D3359-23, *Métodos de prueba estándar para clasificar la adhesión mediante la prueba de cinta*, la cual contempla dos tipos de procedimientos distintos, según el grosor de la película. Por lo tanto, fue indispensable realizar previamente la prueba de medición de grosor.

En este caso, se aplicó el método de corte en "X", que consiste en realizar dos incisiones en forma de cruz sobre la película de recubrimiento ya seca, con un ángulo de entre 30° y 45° y una longitud de 40 mm. Posteriormente, se aplicó una cinta adhesiva transparente de 25 mm de ancho, procurando presionar firmemente para evitar la formación de burbujas de aire. Después de un tiempo de espera de 90 ± 30 segundos, la cinta se retiró de forma rápida y con un movimiento firme, manteniendo un ángulo de 180° respecto a la superficie.

Finalmente, se realizó una inspección visual del área ensayada, comparando los resultados con los criterios de evaluación establecidos en la tabla correspondiente de la norma ASTM D3359-23.






Classification		Surface of "X" - Cut from which flaking/peeling has occurred
5A	No peeling or removal	None
4A	Trace peeling or removal along incisions or at their intersection	
3A	Jagged removal along incisions up to 1/16" on either side	
2A	Jagged removal along most of incisions up to 1/8" on either side	
1A	Removal from most of the area of the X under the tape	
0A	Removal beyond the area of the X	

Ilustración 30. Clasificación de la adhesión por el Método A. ASTM (2023). ASTM-D3359-23, Standard test method for Rating Adhesion by Tape Test.

En la prueba de adherencia mediante corte transversal, se realizaron cortes horizontales y verticales sobre la película de recubrimiento ya seca. De acuerdo con la norma ASTM D3359-23, estos deben consistir en entre 6 y 11 cortes, separados por una distancia de 2 mm.

Se utilizó cinta adhesiva transparente de 25 mm de ancho, la cual fue colocada cuidadosamente sobre la zona marcada, procurando evitar la formación de burbujas de aire. Tras un tiempo de espera de 90 ± 30 segundos, la cinta se retiró con un movimiento firme y rápido, en dirección opuesta a la superficie (ángulo de 180°).

Finalmente, se realizó una inspección visual del área ensayada, siguiendo los criterios de evaluación establecidos en la tabla correspondiente de la norma ASTM D3359-23, la cual se presenta a continuación.

CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT AREA REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 – 15%	
2B	15 – 35%	
1B	35 – 65%	
0B	Greater than 65%	

Ilustración 31. Clasificación de la adhesión por el Método B. ASTM (2023). ASTM-D3359-23, Standard test method for Rating Adhesion by Tape Test.

2.4.4 Prueba de dureza

Las pruebas de dureza sobre la película se realizaron conforme al método establecido en la norma ASTM D3363-22, *Método de ensayo estándar para la dureza de película por prueba de lápiz*, el cual utiliza lápices de diferentes durezas como indicador visual.

Las evaluaciones se llevaron a cabo una vez que la película de recubrimiento se encontraba completamente seca. Para su ejecución, se empleó una pesa de 7.35 N \pm 0.1 N, un transportador y una serie de lápices especiales diseñados específicamente para esta prueba.

$6B - 5B - 4B - 3B - 2B - B - HB - F - H - 2H - 3H - 4H - 5H - 6H$

Softer
Harder

Ilustración 32. Calibre de lápices. ASTM (2022). ASTM-D3363-22, Standard test method for Film Hardness by Pencil Test.

De acuerdo con la norma, los lápices debían prepararse con una punta de 5 a 6 mm de l. Posteriormente, cada lápiz se colocó con una inclinación de $45^\circ \pm 1^\circ$, utilizando un transportador, y se fijó horizontalmente mediante una pesa de 7.35 N, sin ejercer presión adicional sobre la superficie.

A continuación, el lápiz se frotó suavemente contra la película del recubrimiento. Si no se observaba ninguna marca visible de al menos 3 mm de longitud, se procedía a utilizar un lápiz con una dureza mayor.

Una vez que se generaba una marca visible, la prueba se repetía disminuyendo gradualmente la escala de dureza del lápiz, hasta encontrar el valor más alto que no dejara marca alguna sobre la superficie. Este valor se consideró como la dureza de la película.

2.5 Análisis económico

Cabe señalar que el análisis económico se enfocó en un proceso de reproducción básico, orientado a cualquier usuario interesado en el producto y en emprender con volúmenes de producción bajos.

2.5.1 Costos de producción

Se consideraron recursos de fácil acceso y disponibilidad para el usuario, con el propósito de facilitar la reproducción del proceso sin requerir infraestructura especializada.

Tabla 7. Recursos.

Materia prima	Residuos de perla contaminada y polvo. Mezcladores.
Solventes	Gasolina. D-limoneno.
Energía	Rotomartillo.
Mano de obra	Tiempo en horas/hombre

La materia prima utilizada proviene de la línea de extrusión de poliestireno expandido. Para los fines de esta investigación, se consideró como un residuo dispuesto en el ambiente, razón por la cual carece de valor agregado. No obstante, su recolección en las distintas plantas donde es desechado implicó costos asociados al transporte y traslado.

Se emplearon dos tipos de solventes: gasolina y D-limoneno. La gasolina utilizada fue del tipo Magna, adquirida en una estación de servicio. Dado que su precio varía mensualmente, se optó por realizar su adquisición durante un periodo de seis meses, con un precio promedio de \$24.40 MXN por litro. Por otro lado, el D-limoneno fue adquirido mediante compra en línea, en presentaciones de 1 L por botella, a un costo de \$550.00 MXN, envío incluido.

Para las pruebas se utilizaron dos tipos de mezcladores. El mezclador A, diseñado específicamente para las pruebas de disolución, fue elaborado de forma artesanal con una broca de 30 cm y dos láminas de aluminio reutilizadas como residuo. El mezclador B, un mezclador de acero marca WARNER, fue empleado para las pruebas en techumbre, las cuales requerían mayores volúmenes de mezcla. Este último fue adquirido en una tienda minorista especializada en mejoras del hogar y construcción, con un costo de \$124.00 MXN.

El rotomartillo utilizado fue un taladro/desatornillador de la marca Ryobi, con una potencia de 600 W y un consumo de 5 A. Las pruebas se realizaron en la capital del estado de Puebla, en un entorno con tomas de corriente domésticas, por lo que se consideró un consumo eléctrico dentro del rango intermedio (fuera del mercado eléctrico mayorista). Se estimó un costo promedio de \$1.290 MXN por kWh, correspondiente al periodo de uso de seis meses.

Las pruebas fueron ejecutadas por una persona que se trasladaba a las instalaciones de investigación tres veces por semana, durante un periodo de seis meses. El salario mínimo por día en México es de \$278.80 MXN.

Para efectos de comparación económica, se consideró el costo de producción por litro de impermeabilizante elaborado, con una concentración del 15 % en peso de EPS. Esta proporción requirió un tiempo de mezclado estimado entre 20 y 30 minutos.

2.5.2 Comparación con productos similares

Se comparó el comportamiento del recubrimiento impermeabilizante elaborado a base de residuos de poliestireno expandido, utilizando gasolina y D-limoneno como solventes, con tres recubrimientos comerciales orgánicos y poliméricos. Los

productos comerciales seleccionados fueron: Impermeabilizante A (marca FESTER®), Impermeabilizante B (marca Sika®) e Impermeabilizante C (marca IMPAC®).

Las características comparativas se obtuvieron a partir de las fichas técnicas oficiales disponibles en los sitios web de cada marca, considerando los siguientes criterios: costo por metro cuadrado, durabilidad, facilidad de aplicación, costo de adquisición e impacto ambiental.

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.1 Condiciones de mezclado

El resultado de la disolución de los residuos de poliestireno expandido (perla contaminada) fue una mezcla viscosa homogénea. En dicha mezcla se observaron propiedades similares a las de un recubrimiento impermeabilizante.

Debido a las limitaciones observadas durante la aplicación del método de mezclado en laboratorio, se realizaron pruebas fuera de este entorno. Principalmente, se evidenció que las perlas de poliestireno expandido, al estar en contacto prolongado con los solventes, presentaron dificultades para integrarse adecuadamente.

Se observó que la gasolina resultó ser el solvente más apropiado para la elaboración del recubrimiento impermeabilizante. Esto se debió a que, durante el proceso, los residuos de poliestireno expandido (perla contaminada) mostraron una respuesta favorable al entrar en contacto con dicho solvente, lo que evitó la presencia de material plástico sólido o el apelmazamiento de la mezcla.

Por el contrario, el D-limoneno presentó un comportamiento completamente distinto al esperado. Durante la prueba, los residuos de poliestireno expandido en forma de perla contaminada no se disolvieron; en cambio, se observó apelmazamiento del material sólido.

Considerando lo anterior, las limitaciones en el entorno del laboratorio generaron la necesidad de ajustar los procedimientos, respondiendo a las necesidades tecnológicas específicas de la investigación.

Gasolina: se realizó una prueba con proporción del 10 % respecto al peso del residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada (Ilustración 33), con una agitación de 1,200 rpm y una temperatura de 100 °C. La prueba se llevó a cabo dentro de una campana de extracción de aire, ubicada junto a la salida de emergencia, en cumplimiento con las normas NOM-002-STPS-2010, NOM-005-STPS-1998, NOM-018-STPS-2015, las cuales establecen parámetros de prevención de riesgos relacionados con sustancias inflamables, el manejo de

equipos que utilizan combustibles y la identificación de sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.

Se mantuvo una aparente agitación de 1200 rpm en un periodo menor a los 30 minutos y una temperatura constante de 100 °C. No obstante, la mezcla no presentó un comportamiento de disolución aparente, lo cual impidió el adecuado funcionamiento del agitador magnético dentro vaso de precipitado y se observó una acumulación de EPS en el fondo del vaso del recipiente, indicando una condición de apelmazamiento.

Posteriormente la mezcla no mostró cambios en sus propiedades: permaneció como una mezcla heterogénea, ya que se evidenció la presencia de perlas de poliestireno expandido en estado sólido.



Ilustración 33. Gasolina con perla sucia de EPS en calentamiento y agitación constante.

D-limoneno: al igual que en el caso anterior, se realizó una prueba con proporción del 10% respecto al peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada (Ilustración 34), con una agitación de 1200 rpm y una temperatura de 100 °C, durante un lapso de sesenta minutos. Los resultados indicaron condiciones de fundición.

Durante los primeros 30 minutos, no se observó un cambio significativo en la mezcla. En la segunda mitad del tiempo establecido, las perlas de poliestireno expandido perdieron su forma original, y se formó una sustancia viscosa, de

consistencia similar a la plastilina, en el fondo del vaso. No se presentaron condiciones de disolución, Por lo que la mezcla permaneció heterogénea.



Ilustración 34. D-limoneno y perla sucia de EPS con calentamiento y agitación constante.

En contraste, las pruebas realizadas en exteriores presentaron dos tipos de comportamiento, según el tipo de solvente utilizado.

Gasolina: Se realizaron pruebas con proporciones de 5 %, 10 %, 15 % y 20 % respecto al peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada (Ilustración 35), manteniendo una agitación constante de 3,000 rpm y una temperatura ambiente de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, estando al aire libre, con una exposición a la intemperie de 360 °, estando bajo la sombra.

Se dio cumplimiento a los parámetros establecidos por las normas NOM-002-STPS-2010, NOM-005-STPS-1998, NOM-018-STPS-2015, utilizando ropa de algodón y botas anti derrapantes (en caso de derrame de gasolina), y evitando proximidad a fuentes de energía.

Durante un periodo de entre 15 y 30 minutos, las perlas se disolvieron por completo en presencia de la gasolina, dando como resultado una mezcla viscosa y homogénea (Ilustración 37). Asimismo, el método de mezclado presentó ciertos comportamientos diferentes a los esperados.



Ilustración 35. Mezcla homogénea de EPS y Gasolina.

Después de 10 minutos de mezclado continuo, sin importar el porcentaje en peso de EPS presente en la mezcla, el contenedor en el que se efectuaba el proceso comenzó a presentar una disminución de temperatura; es decir, su superficie se enfrió. Sin embargo, esta condición no se observó en la mezcla.

En particular, en las mezclas con una concentración del 15 % y 20 % en peso de EPS, después de 15 minutos de agitación continua, se observaron filamentos plásticos con características pegajosas, similares a telarañas, que se desprendían del contenedor al ambiente. Asimismo, en el extremo del mezclador se aglutinó una sustancia blanca y seca, con una textura semejante al papel, la cual era fácil de remover (*Ilustración 36*).

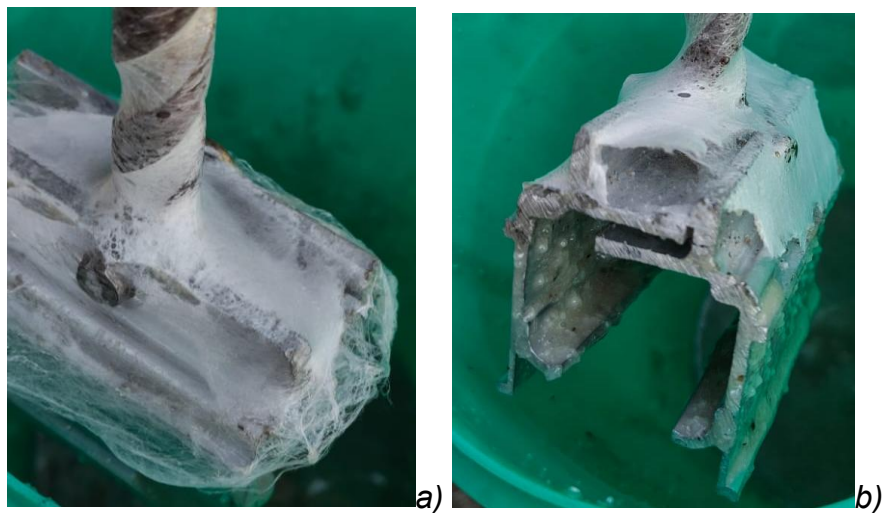
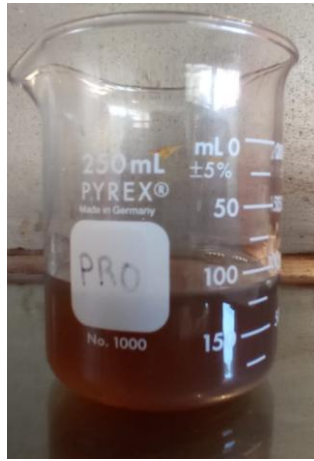
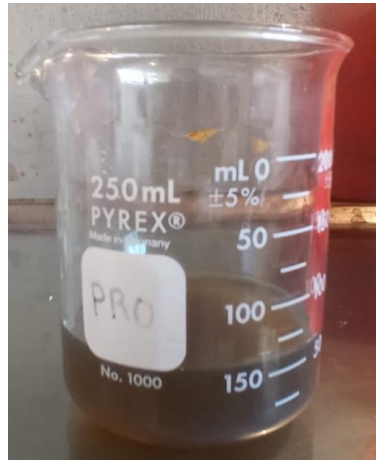


Ilustración 36. Sustancia blanca seca presente en el agitador. 36a), 36b).



a)



b)



c)



d)

Ilustración 37. Gasolina y EPS al 5%. 37a), Gasolina y EPS al 10%. 37b), Gasolina y EPS al 15%. 37c), Gasolina y EPS al 20%. 37c).

Como se puede observar en la tabla 8, las mezclas que requirieron de un mayor tiempo de mezclado fueron las que contenían 15% y 20% respecto al peso de EPS, debido a una mayor presencia de material sólido presente.

Se tomó en cuenta que el tiempo registrado corresponde a un régimen de agitación continua de 3,000 rpm, ya que, a menores velocidades, las mezclas presentaban una disolución incompleta y requerían un tiempo de mezclado más prolongado.

Tabla 8. Tiempo de disolución en Gasolina.

Gasolina con Perla contaminada	
% EPS	Tiempo (min)
5	10
5	15
10	20
10	22
15	25
15	30
20	27
20	30

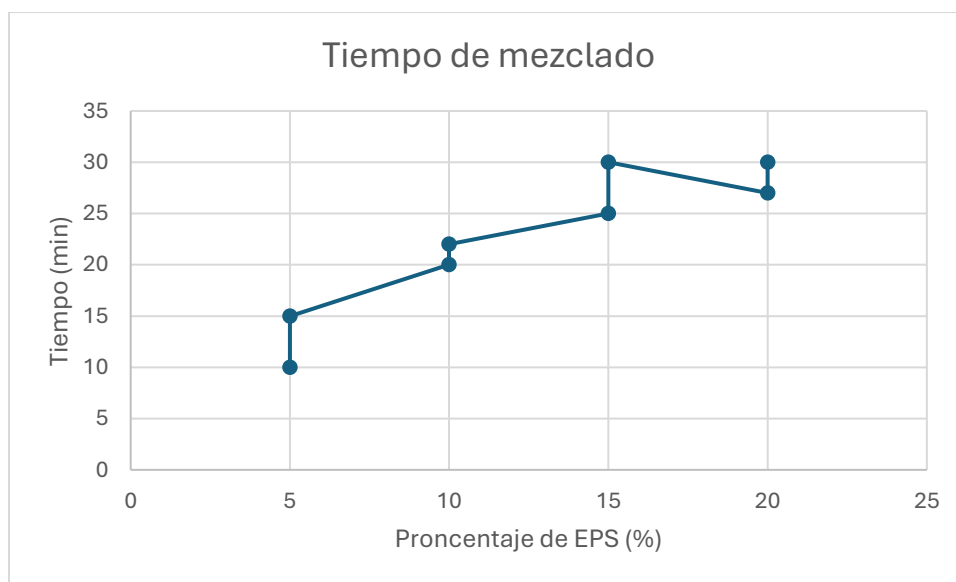


Gráfico 1. Tiempo de disolución.

D-limoneno: En este caso, las pruebas realizadas con proporciones del 10 % y 15 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, manteniendo una agitación constante de 3,000 rpm y una temperatura ambiente de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 30 a 60 minutos, no presentaron condiciones de disolución, evidenciando un apelmazamiento de las perlas de EPS.

En contraste con el comportamiento observado al emplear gasolina como solvente, la temperatura del contenedor no disminuyó, sino que se mantuvo constante a temperatura ambiente.

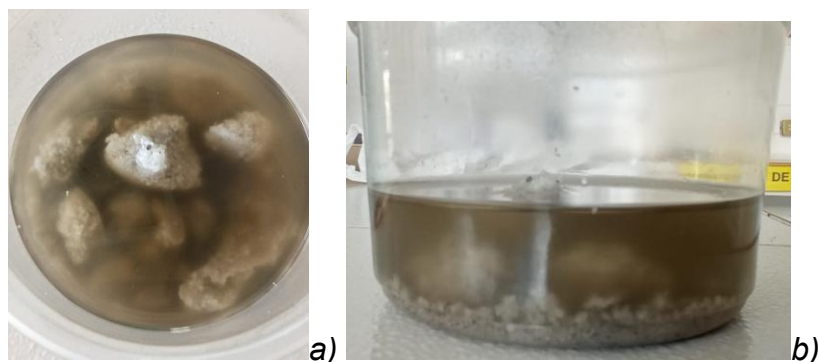


Ilustración 38. D-limoneno y EPS. 38a), 38b).

La utilización de D-limoneno como solvente no favoreció el proceso de disolución, a diferencia de lo planteado por López (2014) y Mendoza (2021), quienes señalan que el D-limoneno actúa como un agente eficaz para la disolución de residuos de poliestireno expandido bajo condiciones de mezclado entre 30 °C y 80 °C.

En cambio, los resultados obtenidos mostraron que, incluso a temperaturas superiores a 100 °C, no se produjo un cambio físico favorable. La mezcla D-limoneno–residuos de poliestireno expandido permaneció heterogénea, y los residuos se fundieron en una masa plástica, maleable y viscosa. Por esta razón, se decidió descartar toda prueba realizada con este solvente.

3.2 Resultados de densidad

Con respecto a sus propiedades fisicoquímicas, la densidad no mostró resultados variaciones significativas en función de la proporción en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en la mezcla, obteniéndose valores inferiores a los de los recubrimientos comerciales (0.8 g/ml).

Tabla 9. Densidad de la disolución en Gasolina.

Gasolina con Perla contaminada				
% EPS	W (g)	w (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
5	83.76	42.94	50	0.8164
5	82.91	42.94	50	0.7994
10	85.38	42.94	50	0.8488

10	83.56	42.94	50	0.8124
15	83.47	42.94	50	0.8106
15	84.76	42.94	50	0.8364
20	83.34	42.94	50	0.808
20	85.12	42.94	50	0.8436

Conforme aumentaba la cantidad de residuo de poliestireno expandido en cada mezcla, tanto el peso del recipiente con la muestra como la densidad no mostraron variaciones significativas más allá de la mezcla al 10 % en peso de poliestireno expandido en forma de perla contaminada.

Además, se observó que las mezclas con concentraciones del 15 % y 20 % en peso presentaron burbujas de aire atrapadas, incluso después del tiempo de reposo indicado por la norma ASTM D1475-13. Si bien las burbujas eran pequeñas, su cantidad fue considerable.

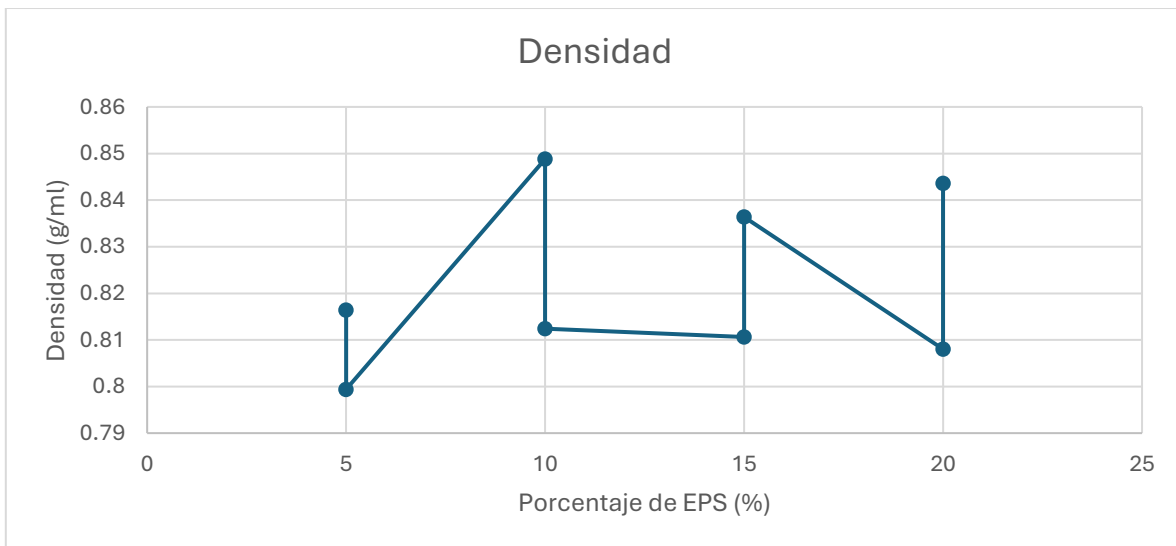


Gráfico 2. Densidad.

3.3 Resultados de viscosidad

La determinación de la viscosidad se realizó conforme a la norma ASTM D1200, utilizando la copa Ford N.º 4.

Se obtuvieron resultados variables, sin observarse una tendencia clara en función del porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla

contaminada presente en la mezcla. Además, se registraron datos negativos, lo que indicó que el comportamiento del sistema no corresponde al de un fluido newtoniano.

Por lo tanto, el recubrimiento impermeabilizante elaborado a base de gasolina y residuos de poliestireno expandido presentó un comportamiento de flujo no newtoniano, es decir, no sigue la ley de viscosidad lineal de Newton, ya que su viscosidad depende del tipo y la magnitud del esfuerzo aplicado, así como del tiempo de aplicación.

Tabla 10. Viscosidad de la disolución en Gasolina en copa FORD N°4.

% EPS	Tiempo, copa FORD N°4 (s)	Viscosidad (cSt)	Viscosidad (cP)
5	15.12	40.9255	33.4115
5	13.19	33.495	26.7759
10	29.02	94.4405	80.1610
10	27.80	89.7435	72.9076
15	2.70	-11.9735	-9.6985
15	1.38	-6.8915	-5.7640
20	1.63	-11.011	-8.8968
20	1.75	-10.549	-8.8991

En el caso de las mezclas homogéneas con proporciones del 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, se registró un tiempo de entre 19.12 y 29.02 segundos para presentar el corte de flujo. Estos valores se consideran aceptables de acuerdo con el rango establecido para la copa Ford N.º 4 (de 20 a 100 segundos).

Los tiempos registrados coincidieron con el lapso necesario para que la copa se vaciara por completo. Por lo tanto, la interrupción del flujo en ambas composiciones se produjo únicamente al agotarse el volumen de líquido contenido en la copa.

En el caso de las mezclas homogéneas con 15 % y 20 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, se registraron tiempos de

2.7 y 1.63 segundos, respectivamente, para presentar un corte de flujo. Estos valores no se consideran aceptables, ya que se encuentran fuera del rango establecido para la copa Ford N.º 4 (de 20 a 100 segundos).

Ambas mezclas mostraron un comportamiento similar respecto al flujo a través de la copa, ya que el vaciado se producía gota a gota, generando cortes recurrentes en la continuidad del flujo de forma inmediata.

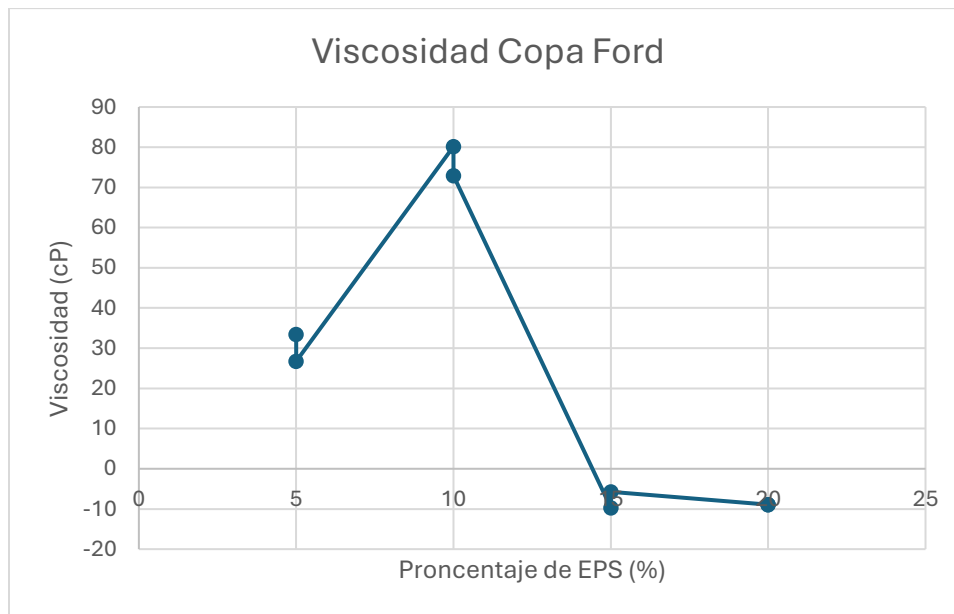


Gráfico 3. Viscosidad Copa Ford.

Al realizar la medición de viscosidad mediante la prueba del lápiz, se obtuvieron resultados con diferentes valores. Se puede observar una tendencia en función de la cantidad del porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en la mezcla, como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 11. Viscosidad de la disolución en Gasolina, prueba del lápiz.

%EPS	Tiempo, Lápiz (s)	Viscosidad (cSt)	Viscosidad (cP)
5	1.10	128.326	104.7653
5	2.30	268.318	214.4934
10	1.75	204.155	173.2867
10	1.50	174.99	142.1618

15	2.9	338.314	274.0343
15	4.7	548.302	458.5997
20	3.78	440.974	356.3076
20	3.70	431.642	364.1331

Conforme aumentaba la cantidad de residuo de poliestireno expandido en cada mezcla, el tiempo necesario para que se presentara el corte de flujo también se incrementaba, lo que sugiere una posible relación entre el porcentaje de EPS y el tiempo de escurrimiento.

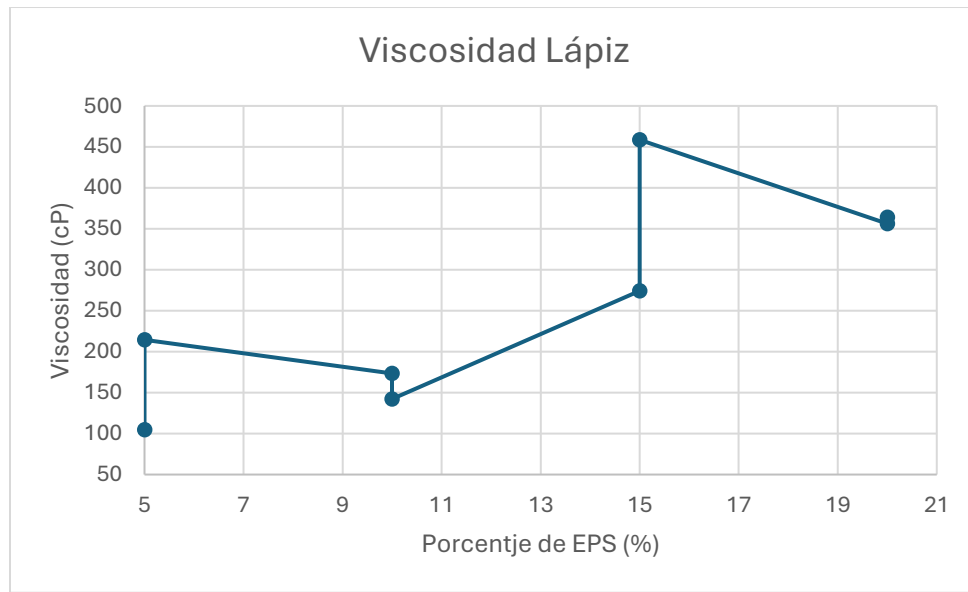


Gráfico 4. Viscosidad prueba de lápiz.

3.4 Resultados de contenido volátil

De acuerdo con la norma ASTM D2369-20, la determinación del porcentaje de contenido volátil se realizó en dos ocasiones, obteniéndose valores superiores al 50 %.

Tabla 12. Contenido volátil y no volátil de la disolución en Gasolina.

%	Peso plato (g)	Peso muestra (g)	S _A	% volátil	% no volátil
5	0.2649	2.867	0.8728	78.7966	21.2033
5	0.2648	2.7835	0.8492	79.00485	20.9951
10	0.2558	2.669	0.9641	73.4619	26.5380
10	0.2761	2.77	1.0649	71.5234	28.4765
15	0.2624	2.75	1.5179	54.3454	45.6545
15	25%	2.49	1.4618	51.4618	48.5381
20	33%	2.3625	1.9224	32.5460	67.4539
20	23%	3.58	2.9953	22.8128	77.1871

Los resultados mostraron una relación directa con el porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en la mezcla. A mayor cantidad de solvente (gasolina), el porcentaje de contenido volátil fue mayor; en cambio, a menor cantidad de solvente, el porcentaje de contenido volátil disminuyó. En la siguiente gráfica podemos apreciar una comparación del porcentaje de contenido volátil y su variación.

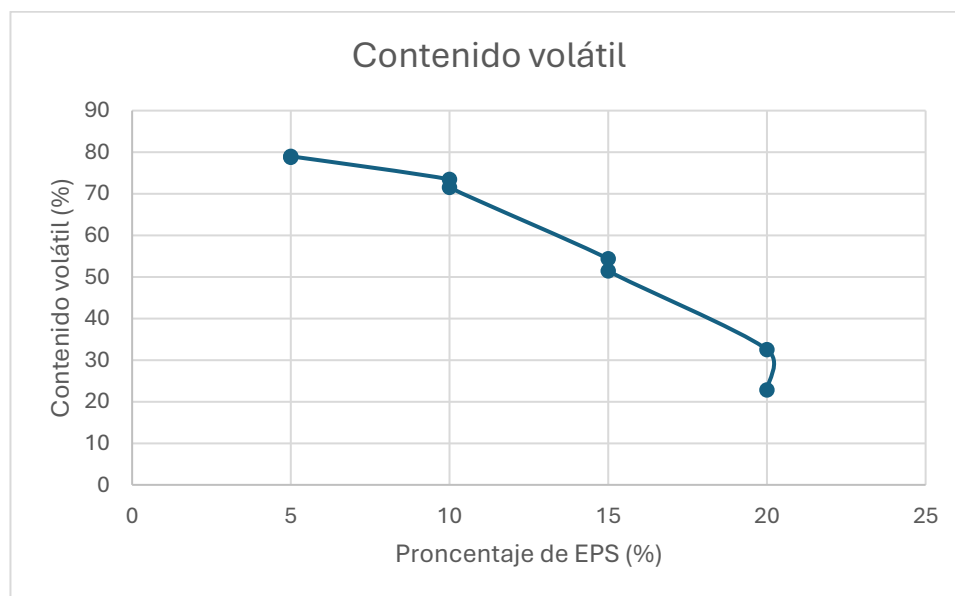


Gráfico 5. Porcentaje de contenido volátil

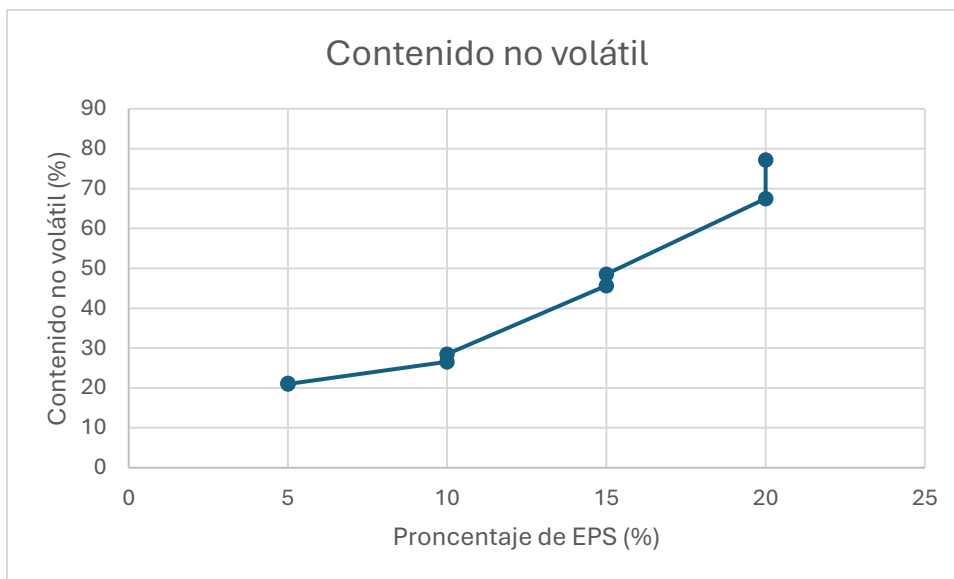
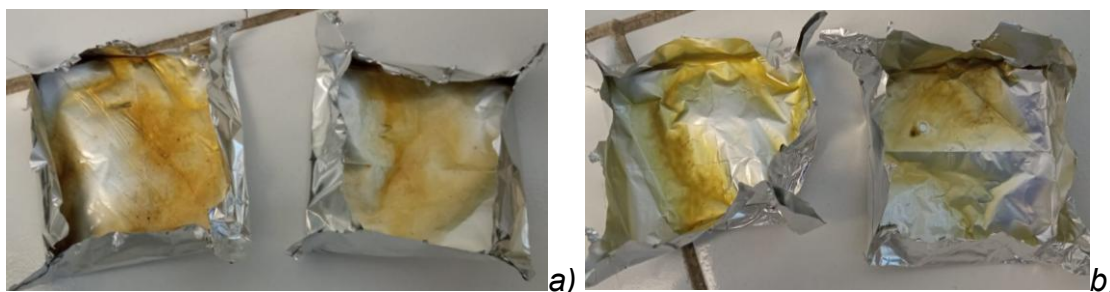


Gráfico 6. Contenido no volátil.

Asimismo, después de 60 minutos en el horno, las muestras presentaban un olor evidente a gasolina.

Adicionalmente, en las mezclas con 15 % y 20 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada (*Ilustración 39c, Ilustración 39d*), se observaron burbujas de aire retenidas, ya sea por las propias características de las mezclas o como resultado de la evaporación de la gasolina, fenómeno similar al registrado en las pruebas de densidad.

Las pruebas se realizaron en apego a lo establecido por la NOM-002-STPS-2010, dado que la colocación de muestras en un horno implicaba la necesidad de aplicar medidas de seguridad adecuadas, con el fin de prevenir el riesgo de incendio.



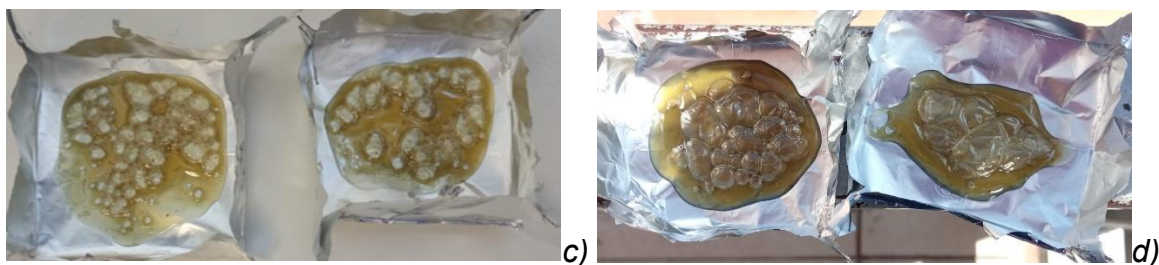


Ilustración 39. Gasolina y EPS al 5%. 39a), Gasolina y EPS al 10%. 39b), Gasolina y EPS al 15%. 39c), Gasolina y EPS al 20%. 39d).

3.5 Resultados del espesor de la película húmeda

En cuanto a su desempeño funcional, la determinación del espesor de la película húmeda del recubrimiento, mediante un medidor para pintura húmeda, arrojó valores significativos, mostrando una tendencia en función del porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en la mezcla. Las pruebas se realizaron sobre una lámina plana de PVC espumado.

De acuerdo con las concentraciones propuestas por Alberola (2014), las mezclas con 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido mostraron un comportamiento adecuado durante la aplicación, caracterizándose por su homogeneidad y facilidad de manejo como recubrimientos impermeabilizantes. En cambio, las mezclas con 15 % y 20 % en peso presentaron mayor resistencia al momento de aplicarse sobre distintos sustratos, lo que provocó una aplicación no homogénea y, por consiguiente, un espesor de película mayor.

Tabla 13. Espesor.

% EPS	Espesor (µm)
5	25
5	25
10	100
10	125
15	250
15	200
20	550

20	500
----	-----

Los resultados mostraron un incremento considerable en función del porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en la mezcla. Es decir, en cada mezcla se observó un aumento mínimo de 100 μm en el espesor de la película.

Este comportamiento fue evidente a simple vista, ya que se pudo observar el cambio físico en cada una de las mezclas. Cabe señalar que, a mayor proporción de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en la mezcla, mayor era la dificultad para manipularla.

En cuanto a las mezclas elaboradas con proporciones del 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, estas resultaron fáciles de manipular. Es decir, su aplicación no presentó inconvenientes, ya que se trataba de mezclas homogéneas en estado líquido.

Respecto a la mezcla elaborada con un 15% en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, esta resultó difícil de manipular. Durante las pruebas, se requirió una mayor fuerza para esparcir la mezcla sobre el sustrato. De igual modo, la película que se impregnó con la mezcla no resultó uniforme, ya que persistió la figura de los filamentos de la brocha.

Finalmente, la mezcla con un 20 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presentó una gran dificultad para ser manipulada. Al momento de introducir la brocha, esta quedaba fuertemente adherida a la mezcla, requiriendo una mayor fuerza para obtener una cantidad adecuada del producto. Asimismo, al retirar la brocha del contenedor, la mezcla mostró un comportamiento similar al de una goma de mascar, presentando una elongación excesiva.

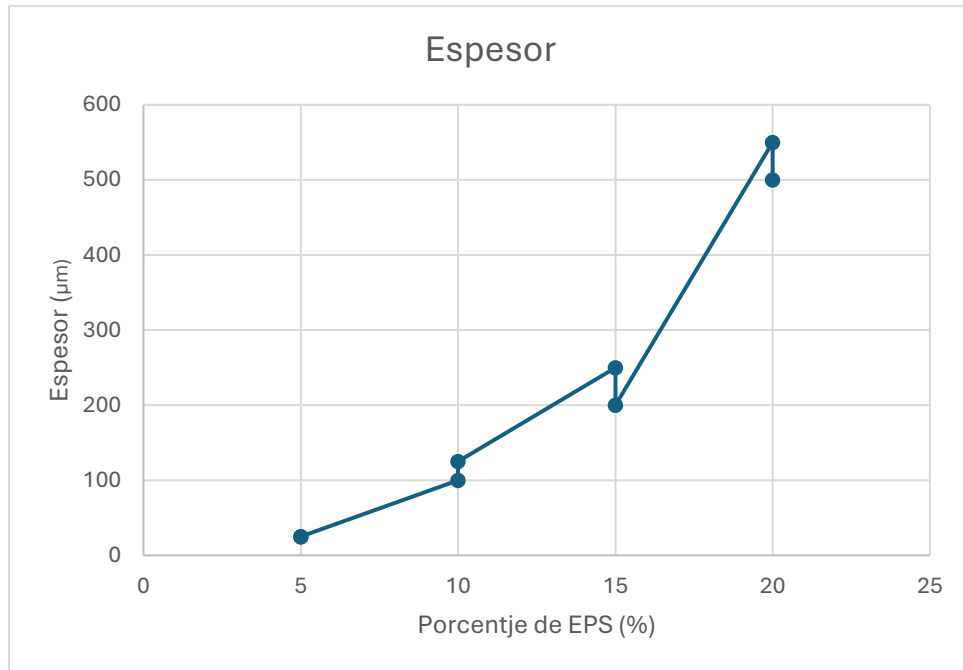


Gráfico 7.Espesor.

Como era de esperarse, el espesor del recubrimiento aumentó de manera proporcional al porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada. De igual forma, las condiciones de manipulación y aplicación aumentaron progresivamente su dificultad en la misma proporción.

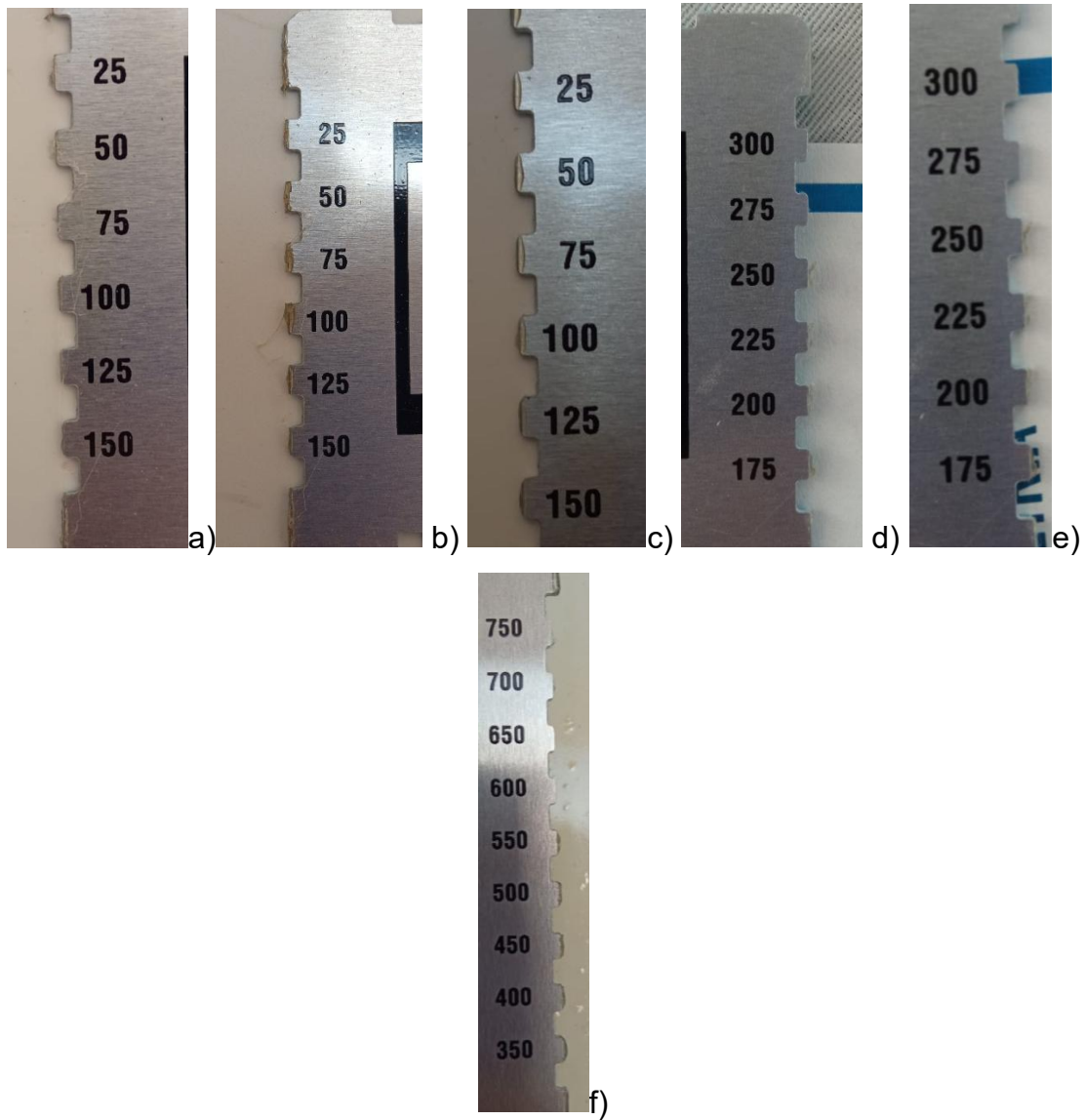


Ilustración 40.5% de EPS. 40a), 10% de EPS. 40b) y 40c), 15% de EPS. 40d) y 40e), 20% de EPS. 40f).

3.6 Resultados del tiempo de secado

Los tiempos de secado obtenidos fueron distintos a los esperados. No se identificó una tendencia clara en relación con el porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en las mezclas aplicadas sobre una lámina de PVC espumado plana.

Tabla 14. Tiempos de secado.

%EPS	Tiempo de secado/Tiempo seco duro (min)
5	21
5	15
10	23
10	20
15	30
15	15
20	30
20	22

Esta prueba se realizó conforme a lo establecido por la norma ASTM-D1640-14-2022. Los resultados obtenidos incluyeron tres lapsos de tiempo para cada mezcla: *Tiempo de tacto al tacto*, *tiempo seco al tacto* y *tiempo seco duro*.

De estas tres variables, únicamente se consideró la última, *tiempo seco duro*, la cual indicó el tiempo requerido para que la mezcla aplicada sobre el sustrato dejara de presentar facilidad de manipulación, deformación o desprendimiento asociado a la humedad residual. Este parámetro permitió determinar que la mezcla se encontraba completamente seca y en condiciones adecuadas para su funcionamiento.

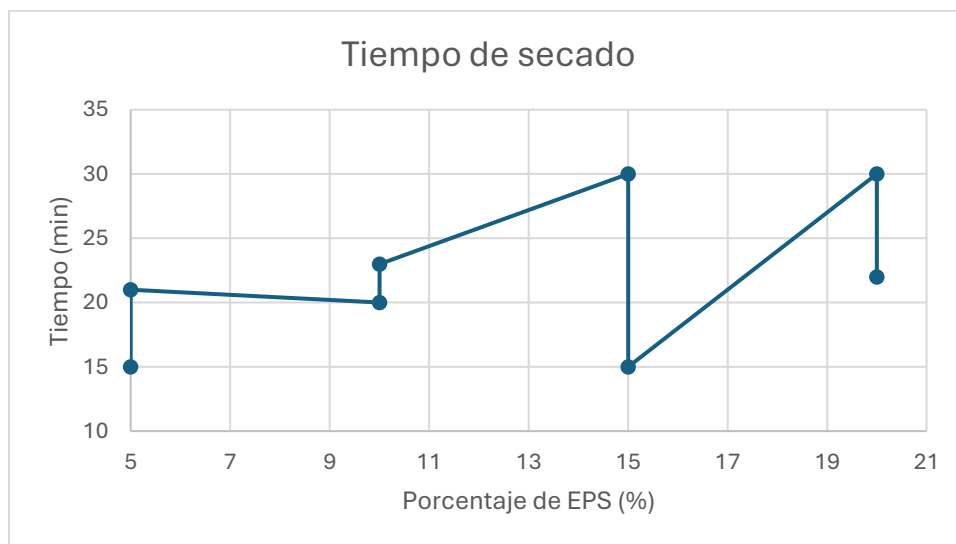




Gráfico 8. Tiempos de secado.

Se observó que el tiempo de secado para las mezclas con 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada aumentó de manera proporcional. No obstante, al realizar la prueba con la mezcla al 15 % en peso, se registró un tiempo de secado menor en comparación con las anteriores: en tan solo cinco minutos, la aplicación sobre el sustrato no presentó humedad alguna, lo que permitió el contacto con la yema de los dedos sin evidenciar desprendimiento ni adhesión. Por otro lado, la mezcla al 20 % en peso mostró un incremento en el tiempo de secado, alcanzando los 12 minutos. Aunque este tiempo fue menor al registrado en las mezclas de 5 % y 10 %, se observó que la película de recubrimiento presentó dificultades en su aplicación, lo que generó una capa más gruesa y con presencia de burbujas de aire.

3.7 Resultados de la prueba de adhesión

La prueba de adhesión se llevó a cabo conforme a lo establecido en la norma ASTM-D3359-23. Por lo tanto, para cada mezcla fue necesario replicar el procedimiento en tres ocasiones. Asimismo, el método de evaluación se eligió con base en el espesor de la película obtenida en cada caso.

Tabla 15. Resultados de área removida PVC.

%EPS	Método	Evidencia	Área removida
5	Método B (Prueba de cinta de corte cruzado)		Mayor al 65% 0B
			Mayor al 65% 0B

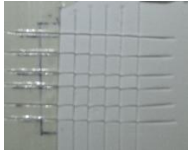
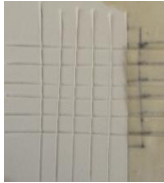









10	Método B (Prueba de cinta de corte cruzado)		Mayor al 65% 0B
			Mayor al 65% 0B
15	Método A (Prueba de cinta X-Cut)		Eliminación de la mayor parte del área de la X bajo la cinta 1A
			Remoción más allá del área de la X 0A
20	Método A Prueba de cinta X-Cut)		Eliminación de la mayor parte del área de la X bajo la cinta 1A
			No pelar ni quitar 5A

Tabla 16. Resultados de área removida Ladrillo.

%EPS	Método	Evidencia	Área removida
5	Método B (Prueba de cinta de corte cruzado)		0% nada 5B
			0% nada 5B
10	Método B (Prueba de cinta de corte cruzado)		0% nada 5B
			0% nada 5B
15	Método A (Prueba de cinta X-Cut)		Remoción irregular a lo largo de las incisiones de hasta 1/16" en ambos lados












			3A
			Remoción irregular a lo largo de las incisiones de hasta 1/16" en ambos lados 3A
20	Método A (Prueba de cinta X-Cut)		No pelar ni quitar 5A
			No pelar ni quitar 5A

Tabla 17. Resultados de área removida Concreto.

%EPS	Método	Evidencia	Área removida
5	Método B (Prueba de cinta de corte cruzado)		Menos del 5% 4B
			Menos del 5% 4B
10	Método B (Prueba de cinta de corte cruzado)		Menos del 5% 4B
			Menos del 5% 4B

15	Método A (Prueba de cinta X-Cut)		Remoción irregular a lo largo de las incisiones de hasta 1/8" en ambos lados 2A
			Remoción irregular a lo largo de las incisiones de hasta 1/8" en ambos lados 2A
20	Método A (Prueba de cinta X-Cut)		No pelar ni quitar 5A

			<p>No pelar ni quitar 5A</p>
--	--	--	----------------------------------

Se observó que los recubrimientos con 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada no mostraron eficiencia sobre superficies lisas y no porosas, ya que en los tres ensayos se produjo un desprendimiento total de la película aplicada. En el caso del recubrimiento con 15 % en peso de residuo de poliestireno expandido, se presentó un comportamiento similar al de las mezclas al 5 % y 10 %. Las muestras mostraron un alto porcentaje de desprendimiento de la película, en contraste con los sustratos porosos en donde presentaron una resistencia al desprendimiento favorable. No se identificó ningún factor externo que explicara esta diferencia, salvo la posición cartesiana en la que fue aplicada la muestra, lo cual podría haber influido en el comportamiento del recubrimiento.

Con respecto al recubrimiento con 20 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, se presentó un comportamiento diferente al de las demás mezclas, ya que las muestras de película permanecieron intactas y sin deformación alguna sobre sustratos porosos y no porosos. Se observó que esta última correspondía a una zona donde la película aplicada era más delgada en comparación con las otras dos. Esta condición se atribuyó a la dificultad para manipular la mezcla, lo que ocasionó una aplicación desigual sobre el sustrato, generando zonas con película más gruesa y presencia de burbujas de aire.

3.8 Resultados de la prueba de dureza

Las pruebas de dureza se realizaron sin el uso de una pesa de 0.75 N, como lo establece la norma ISO 15184. En su lugar, se aplicó una presión moderada manualmente sobre una lámina de PVC espumado plana. Los resultados obtenidos presentaron pequeñas variaciones entre cada marca evaluada.

Tabla 18. Durezas.

%EPS	Dureza de rayado (Si sufre deformación)	Dureza de marca (No sufre deformación)
5	6B	8B
10	4B	5B
15	B	2B
20	F	HB

La dureza obtenida aumentó conforme se incrementó el porcentaje en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presente en cada mezcla, lo que evidenció una tendencia creciente.

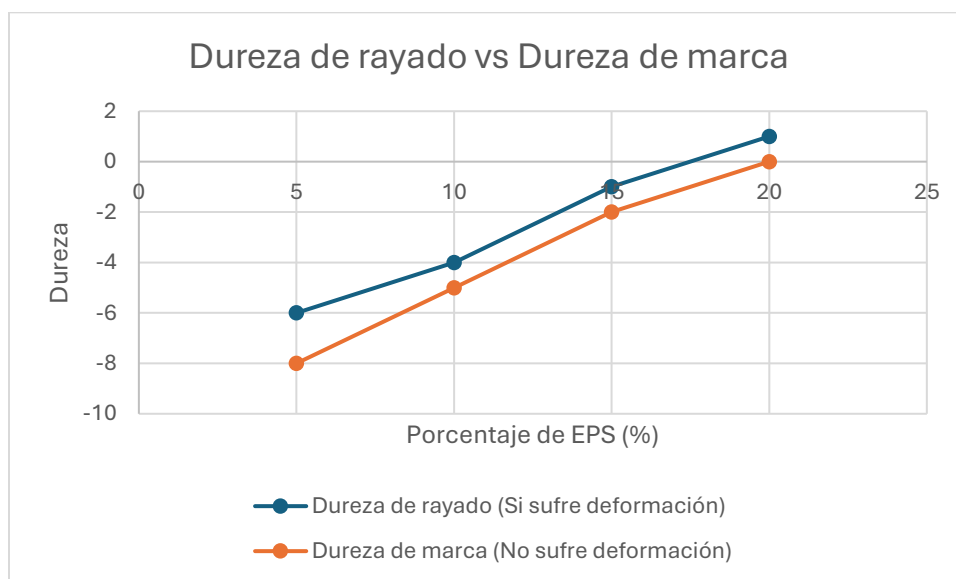


Gráfico 9. Durezas.

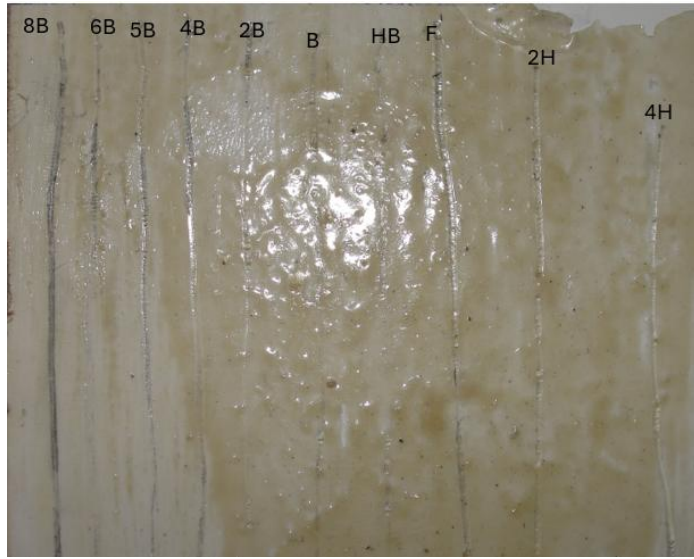
Respecto al recubrimiento con 5 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, se observó que, desde el primer lápiz suave (8B), ya

se generaba una marca sobre la película, aunque sin producir deformación. Asimismo, el deslizamiento de cada lápiz no presentó inconvenientes ni resistencia al movimiento.

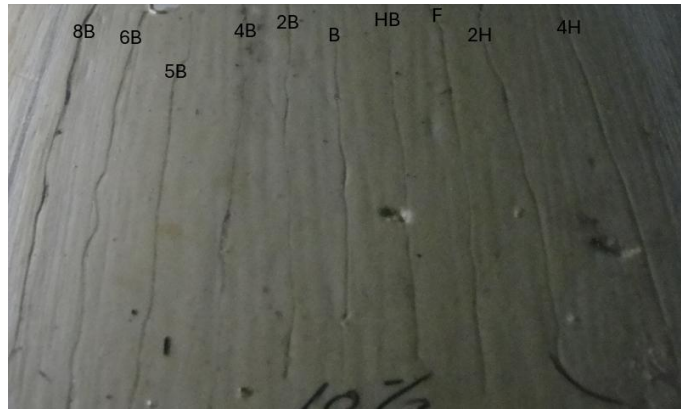
En el recubrimiento con 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, se observó que la última marca de grafito correspondió a un lápiz tres grados más duro que el registrado en la mezcla anterior. A pesar de ello, la película aplicada no presentó resistencia al desplazamiento de los lápices.

En cuanto al recubrimiento con 15 % en peso, se presentaron dificultades durante el desplazamiento del lápiz, debido a que la película no era uniforme y mostraba imperfecciones que, en varias ocasiones, provocaban que la punta del lápiz se atorara. No obstante, se identificó con claridad que la última marca visible de grafito correspondía también a un lápiz tres grados más duro que el del recubrimiento al 10 %.

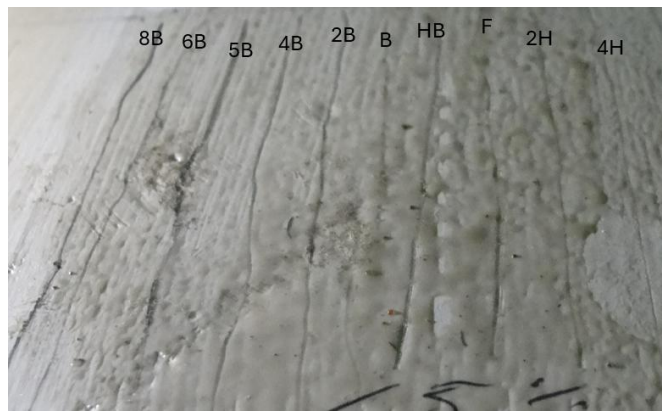
Por último, el recubrimiento con 20 % en peso fue el que presentó mayor dureza. La última marca visible se registró con el lápiz HB (Hard Black). Se consideró que este resultado pudo haberse visto influido por la falta de uniformidad en la película, la presencia de burbujas de aire atrapadas entre el sustrato y el recubrimiento, así como por otras imperfecciones que dificultaron el deslizamiento adecuado del lápiz. Aun con estas condiciones, mostró un comportamiento de dureza superior al del resto de las mezclas.



a)



b)



c)

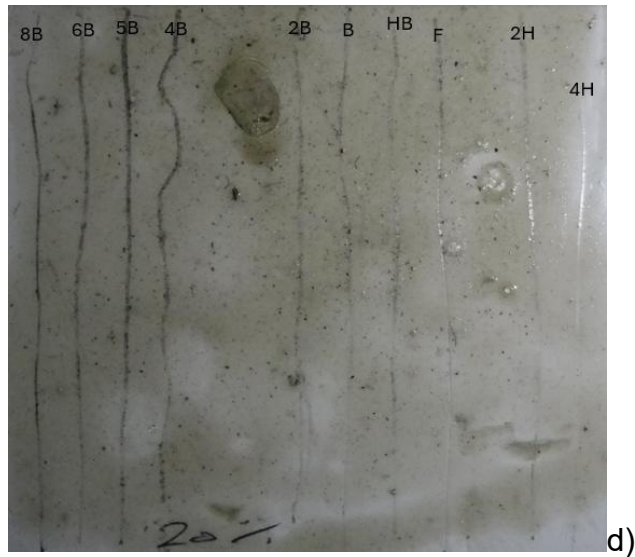


Ilustración 41. Durezas. 5% de EPS. 42a), 10% de EPS. 42b), 15% de EPS. 42c), 20% de EPS. 42d).

3.9 Aplicación del recubrimiento impermeabilizante sobre diferentes sustratos

Se realizaron aplicaciones del recubrimiento impermeabilizante sobre distintos tipos de sustratos: concreto, ladrillo, tubo de PVC, lámina de PVC espumado y la superficie de un techo con restos de impermeabilizante rojo y concreto. En todos los casos, únicamente se observó su comportamiento superficial durante un periodo de 30 días.

Asimismo, la aplicación del recubrimiento impermeabilizante se llevó a cabo para cada uno de los porcentajes en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, con excepción de la aplicación sobre el techo.



Ilustración 42. Aplicación en concreto.

Se realizaron aplicaciones del recubrimiento impermeabilizante sobre distintos tipos de sustratos: concreto, ladrillo, tubo de PVC, lámina de PVC espumado y la superficie de un techo con restos de impermeabilizante rojo y concreto. En todos los casos, únicamente se observó su comportamiento superficial durante un periodo de 30 días.

Asimismo, la aplicación del recubrimiento impermeabilizante se llevó a cabo para cada uno de los porcentajes en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada, con excepción de la aplicación sobre el techo.



Ilustración 43. Aplicación en ladrillo.

Se aplicó el recubrimiento sobre un fragmento de ladrillo denominado "cuadrado", el cual presentaba una superficie porosa, rugosa y con relieves.

La aplicación de los recubrimientos con 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada no presentó inconvenientes; además, estas formulaciones mostraron buena adherencia, rellenando adecuadamente las partes porosas del sustrato.

En contraste, los recubrimientos con 15 % y 20 % en peso de residuo de poliestireno expandido presentaron mayores dificultades de aplicación sobre el sustrato. Si bien no hubo problemas de adherencia, resultó complicado distribuir el recubrimiento de forma homogénea, debido a que no penetraba fácilmente en los poros ni se adaptaba a los relieves, lo que redujo la efectividad de la aplicación.

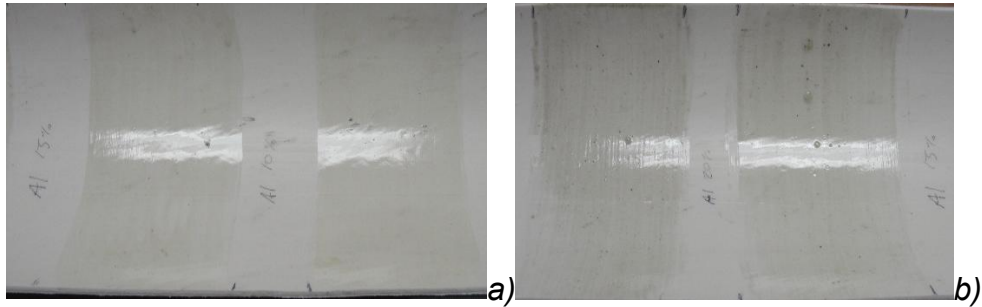


Ilustración 44. Aplicación en tubo de PVC. 45a), 45b).

El tubo de PVC, al ser un material no poroso, facilitó la aplicación para los cuatro porcentajes en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada.

Se observó que, el recubrimiento impermeabilizante, estando en contacto con el sustrato no poroso, al momento de secarse, fue fácilmente removido, simulando el comportamiento del desprendimiento de pegamento líquido seco.

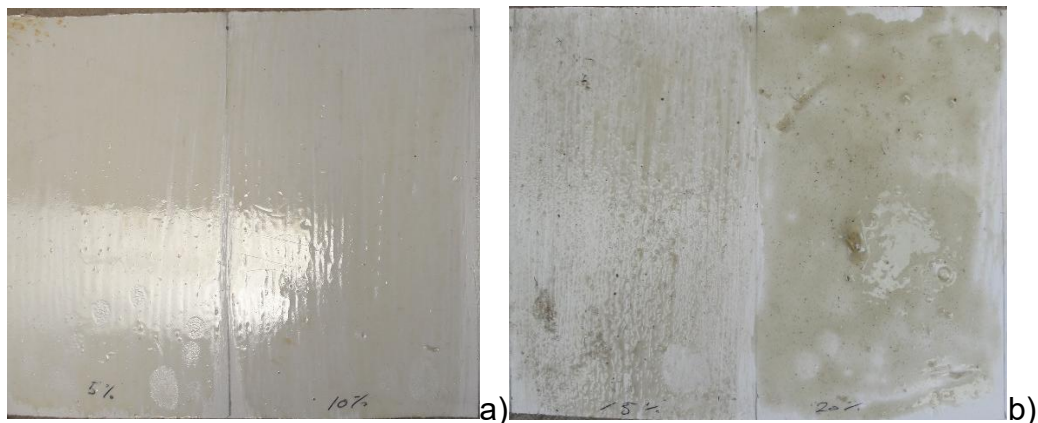


Ilustración 45. Aplicación en lámina de PVC inflado. 46a), 46b).

La lámina de PVC inflado presentó resultados idénticos a los de la prueba con el tubo de PVC; al tratarse de un material no poroso, facilitó la aplicación para los cuatro porcentajes en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada. De igual modo, el recubrimiento pudo ser removido con facilidad, asimilándose con el comportamiento del desprendimiento de pegamento líquido seco.

Por otra parte, en el caso de la mezcla con un 20 % en peso de residuo de poliestireno expandido, la adherencia evaluada conforme a la norma ASTM-D3359-23 (Métodos de ensayo estándar para clasificar la adhesión mediante la prueba de cinta) fue notablemente más eficiente en comparación con las demás formulaciones. No obstante, se destaca que dicho comportamiento fue atípico, ya que la película del recubrimiento impermeabilizante no presentaba una aplicación homogénea.

Asimismo, el recubrimiento impermeabilizante a base de gasolina mostró una aplicación eficiente sobre sustratos como el concreto y el ladrillo. Las mezclas al 5 % y 10 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada presentaron un comportamiento homogéneo de cobertura, logrando cubrir adecuadamente las grietas y relieves superficiales. En contraste, las mezclas al 15 % y 20 % no lograron una cobertura uniforme sobre el ladrillo, dejando espacios sin recubrimiento en las zonas irregulares. Sin embargo, en el caso del concreto, la heterogeneidad de la película aplicada no afectó su adherencia ni su cobertura.

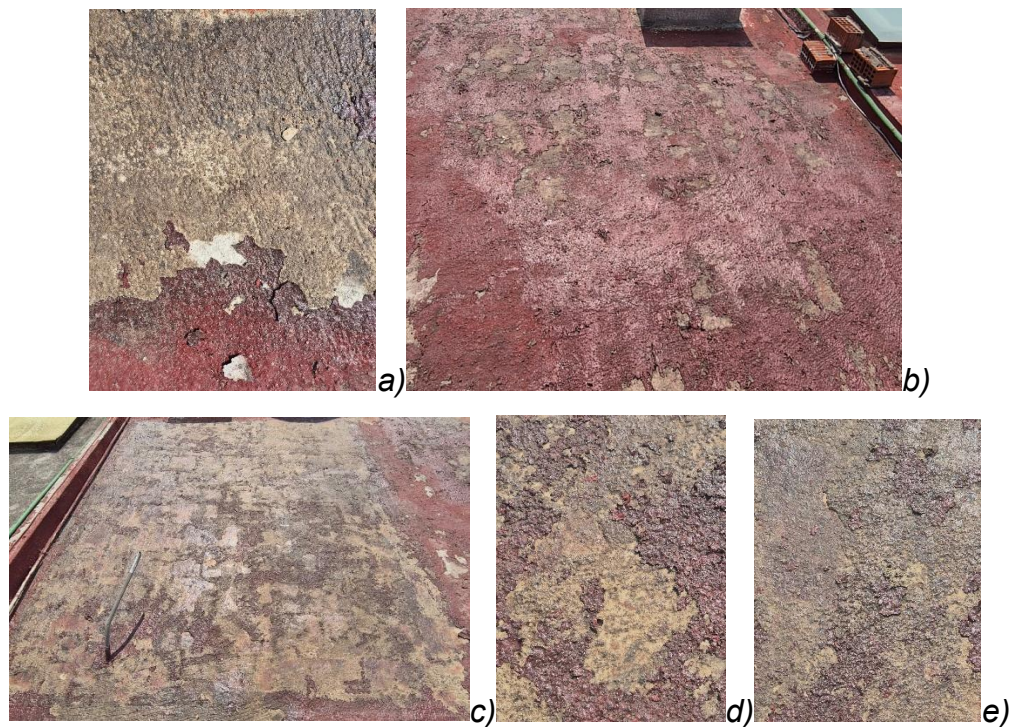


Ilustración 46. Aplicación en techo. 47a), 47b), 47c), 47d), 47e).

La aplicación en techo se realizó con una mezcla al 15 % en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada. Esta se aplicó en dos áreas: una con la superficie previamente limpia, donde se retiró el impermeabilizante rojo hasta dejar expuesto únicamente el concreto agrietado; y otra donde se conservaron los restos del impermeabilizante rojo original.

En la zona limpia, el recubrimiento mostró un comportamiento similar al observado en las pruebas sobre concreto, sin presentar dificultades durante su aplicación y logrando rellenar eficazmente las grietas presentes.

En cambio, en las áreas donde permanecieron restos del impermeabilizante rojo, aunque no se presentaron complicaciones visibles durante la aplicación, se observó que la capa de recubrimiento impermeabilizante se desprendía con mayor facilidad, debido a que se despegaba junto con el recubrimiento previo mal adherido.

3.10 Resultados del análisis económico

Tabla 19. Total, materia prima.

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Subtotal (MXN)
EPS reciclado	kg	2	0	0
Gasolina	L	1	24.4	24.4
D-limoneno	L			0
Total, Materia Prima				24.4

La materia prima utilizada fue un residuo proveniente de la línea de extrusión de poliestireno expandido, el cual normalmente se dispone al ambiente y no presenta valor agregado, por lo que no implicó un costo de adquisición. Sin embargo, se consideró el factor de contaminación asociado, presente en forma de materia orgánica e inorgánica (como pasto, tierra, hojas de árboles y piedras), lo que hizo necesario implementar una etapa de pretratamiento basada en la separación física, además se consideró el costo de traslado (traslado en transporte público, \$8.50 MXN por viaje) que involucró la recolección de la materia prima en los puntos de generación de residuos.

Se aclara que esta investigación se realizó con un punto de vista de fabricación casera en un volumen bajo.

Esta etapa implicó un incremento en la demanda de mano de obra, medido en horas/hombre. Se utilizaron dos tipos de solventes: gasolina y D-limoneno. La gasolina empleada fue Gasolina Magna, adquirida en una estación de servicio, con un costo promedio de \$24.40 MXN por litro durante un periodo de seis meses, considerando las variaciones mensuales en su precio. Por otro lado, el D-limoneno fue adquirido mediante compra en línea, en presentación de 1 litro por botella, con un costo de \$550 MXN, envío incluido.

Se utilizaron dos mezcladores. El mezclador A fue diseñado específicamente para las pruebas de disolución y se elaboró con una broca de 30 cm y dos láminas de aluminio reutilizadas como residuo. El mezclador B, un mezclador de acero marca WARNER, se utilizó para las pruebas en techumbre que requerían un mayor volumen de mezcla; este fue adquirido en una tienda minorista especializada en productos para mejora del hogar y construcción, con un costo de \$124 MXN.

El rotomartillo utilizado fue un taladro/desatornillador marca Ryobi, con una potencia de 600 W y 5 A. Las pruebas se realizaron en la capital del estado de Puebla, en un entorno con tomas de corriente de uso doméstico, por lo que el consumo se consideró dentro del rango intermedio (fuera del mercado eléctrico mayorista). Su uso fue requerido durante 5 horas al día, tres veces por semana durante seis meses, con un costo de energía de \$1.290 MXN por kWh.

Tabla 20. Total, operación directa.

Concepto	Unidad	Cantidad o tiempo	Costo unitario	Subtotal (MXN)
Energía eléctrica	kWh	5	1.29	6.45
Mano de obra	h	3	34.85	104.55
Mezclador A	lote o unidad	1	0	0
Mezclador B	lote o unidad	1	124	124
Total Operación Directa				111

Las pruebas fueron realizadas por una persona que se trasladaba a las instalaciones de investigación utilizando transporte público, 3 horas al día, tres veces por semana durante un periodo de seis meses con un costo por mano de obra de \$34.85 MXN por hora.

Tabla 21. Total, costos indirectos.

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Subtotal (MXN)
Transporte de materiales	viaje/km	6	8.5	51
% uso de mezclador por litro		0.05	124	6.2
Total Costos Indirectos				57.2

El costo de producción considerado para la comparación con otros recubrimientos fue calculado con base en la elaboración de 1 litro de impermeabilizante, a una concentración de entre 10 % y 15 % en peso de EPS. Para dicha proporción, el tiempo estimado de mezclado fue de entre 20 y 30 minutos.

Tabla 22. Composición de mezcla para 1L de recubrimiento al 15% en peso de EPS.

% de EPS	v_E (ml)	v_S (ml)	m_E (g)	m_S (g)	m_T (g)
15	32.23	217.76	29.2	165.5	194.7

Se estimó que la elaboración de 1 litro de recubrimiento impermeabilizante al 15 % en peso de EPS, bajo condiciones de laboratorio, tuvo un costo de \$275.14 MXN. Asimismo, se señaló que, por los alcances del proyecto, no se consideraron factores como los costos de envasado, almacenamiento, transporte y comercialización.

Tabla 23. Costos para 1L de recubrimiento al 15% en peso de EPS.

Concepto	Fórmula
Costo Directo total por lote (MXN)	192.6
Litros obtenidos por lote	0.7
Costo por litro (MXN/L)	275.1429

Asimismo, se realizó una comparación del recubrimiento impermeabilizante elaborado con recubrimientos comerciales disponibles en el mercado. Para ello, se

seleccionaron productos clasificados como “impermeabilizantes asfálticos base solvente o híbridos”, ya que se buscó que cumplieran con la misma funcionalidad y compartieran una base de solventes similar.

Tabla 24. Tabla comparativa de recubrimientos.

Prueba	Recubrimiento A	Recubrimiento B	Recubrimiento C	Recubrimiento EPS - Gasolina
Color	Negro brillante	Negro	Negro	Café oscuro
Olor	A solvente	Característico a solvente	N/A	A solvente
Composición	Base solvente (asfaltos refinados de petróleo y solvente de rápida evaporación)	Base solvente (asfaltos refinados de petróleo y solventes volátiles)	Formulado principalmente base agua “amigable con el ambiente”	Base solvente (residuos de poliestireno expandido y solvente de rápida evaporación)
Densidad ASTM D1475-13	1.02 – 1.06	1.07 ± 0.01	1.015 – 1.075	0.79 – 0.884
Contenido no volátil ASTM D2369-20	63 – 69	72 ± 2	N/A	21 - 77
Tiempo de secado ASTM D1640-14	24 min	1,440 min	60 min – 120 min	15 min – 30 min

Recubrimiento A: FESTER Vaportite 550. Recubrimiento B: IMPAC BS-100.

Recubrimiento C: Sika Permalastik Pro.

Por los alcances del proyecto, los datos analizados fueron: color, olor, composición, densidad, contenido de material no volátil y tiempo de secado, conforme a la información obtenida de sus respectivas fichas técnicas. De este modo, se identificaron áreas de oportunidad en el recubrimiento impermeabilizante elaborado a partir de residuos de poliestireno expandido.

Conclusiones

- Se logró el uso de residuos de poliestireno expandido (perla contaminada) obtenidos de la producción de extruidos de poliestireno expandido para el desarrollo de una mezcla viscosa homogénea mediante su disolución en un solvente (Gasolina) con propiedades impermeabilizantes.
- De acuerdo con los resultados, es factible la utilización de la mezcla de hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos (gasolina) para crear una mezcla viscosa homogénea. En cambio, el D-limoneno presentó un desempeño deficiente para la disolución de residuos de EPS bajo condiciones ambientales, a condiciones elevadas de temperaturas e inclusive en agitación constante, lo que resultó en la fundición de los residuos, formando una mezcla heterogénea de plástico maleable y solvente.
- La mezcla de hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos (gasolina) demostró ser un solvente eficaz para la disolución de residuos de poliestireno expandido (perla y polvo) a temperatura ambiente (22°C-25°C), con tiempos de disolución inferiores a 40 minutos y a una velocidad de mezclado de 3000 rpm, la variable determinante del proceso, mientras que la temperatura no presentó condiciones críticas.
- El recubrimiento impermeabilizante a base de Gasolina resultó ser menos denso que las formulaciones obtenidas con recubrimientos comerciales con valores entre 0.79 g/ml - 0.88 g/ml. Las mezclas del 5% al 15% en peso de residuo de poliestireno expandido contienen una cantidad de material no volátil inferiores al 60%, mientras que la mezcla al 20% alcanzó un porcentaje de material no volátil entre 60% - 77% y un tiempo de secado de 15 min - 30 min, lo que se percibe como un recubrimiento con características similares a los recubrimientos comerciales.
- El recubrimiento impermeabilizante EPS - gasolina presentó una densidad menor respecto a la del agua debido a estar compuesto de poliestireno, un porcentaje de contenido volátil entre el 78% al 22% lo que indica una elevada pérdida de solvente por evaporación en lo que respecta a composiciones del 5% y 10%, lo que sugiere la necesidad de optimizar la formulación de la mezcla

para mejorar su estabilidad y reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

- La aplicación del recubrimiento impermeabilizante a base de gasolina al 5% y 10% en peso de residuo de poliestireno expandido en forma de perla contaminada mostró una formación de película homogénea, con buena adherencia y capacidad de rellenar las superficies del ladrillo y concreto, presentando resistencia al desprendimiento, indicando una interacción favorable con materiales porosos. Por otra parte, sobre superficies no porosas como el PVC rígido y espumado, mostró un comportamiento similar al de un barniz con poca adherencia y de fácil remoción. Adicionalmente, las mezclas al 15% y 20% en peso de residuo de poliestireno expandido en PVC, ladrillo y concreto presentaron resistencia en la aplicación de una película homogénea debido a la alta viscosidad, limitando su correcta aplicación.

Bibliografía

1. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (2022). *Municipal Solid Waste Facts and Figures*. Disponible en: <https://www.epa.gov>
2. Agencia Internacional de Energía (IEA). (2021). *The Role of Plastics in Carbon Emissions*. París, Francia: IEA.
3. Alberola, R. A., De Vecchio, R. P., Reygadas, C. X., & Rhoads, L. A. (2014). *Eco-estireno De no Reciclable a Re-utilizable*. Universidad Nacional Autónoma de México.
4. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643.
5. Arthuz López, J. L. (2019). *Análisis del proceso de reciclaje del poliestireno expandido de arreglos florales fúnebres con el solvente d-limoneno con relación a la sostenibilidad ambiental*.
6. Arriola Lara, E. A., & Velásquez Martell, F. E. (2013). *Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)* (Tesis doctoral, Universidad de El Salvador).
7. ASTM, American Society for Testing and Material. (2025). *Lista de normas ASTM disponibles en español*.
8. Atkins, P., & de Paula, J. (2017). *Physical Chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.
9. Avellaneda Díaz, D. C. (2017). *Evaluación para la obtención de un recubrimiento con resina a base de poliestireno expandido reciclado a nivel laboratorio*.
10. Boluda, C. J., Macías, M., & González Marrero, J. (2019). La complejidad química de las gasolinas de automoción. *Ciencia, Ingenierías & Aplicaciones*.

11. El Naqa, I., & Murphy, M. J. (2015). What is machine learning? (pp. 3-11). Springer International Publishing.
12. García, M. T., Gracia, I., Duque, G., De Lucas, A., & Rodríguez, J. F. (2009). Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste Management*, 29(6), 1814-1818.
13. Gibson, L. J. (2016). *Cellular Solids: Structure, Properties, and Applications*. Cambridge University Press.
14. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
15. IBM, International Business Machines Corporation. (2025). *¿Qué es el machine learning (ML)?*
16. ISO, International Organization for Standardization. (2025). *ISO - Normas*.
17. Jones, D. A. (2013). *Principles and Prevention of Corrosion* (2nd ed.). Prentice Hall.
18. López, D., Rhenals, P., Tangarife, M. A., Vega, K., Rendón, L., Vélez, Y., & Ramírez, M. (2014). Tratamiento de residuos de poliestireno expandido utilizando solventes verdes. *Revista Investigaciones Aplicadas*.
19. McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2004). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.
20. Mendoza, I. D. P., & Pulido, J. L. (2021). Efecto de la concentración y temperatura en la disolución de poliestireno expandido usando solventes naturales. *Avances Investigación en Ingeniería*, 18(2).
21. Mills, D. J., & Wilkins, A. D. (2015). *Protective Coatings for Industrial Applications*. Springer.
22. Mitchell, T. M. (1997). *Machine Learning*. New York: McGraw-Hill.

23. Ocean Conservancy. (2022). *International Coastal Cleanup Report*. Washington, D.C.: Ocean Conservancy.
24. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Assessment of Plastic Pollution in Marine Ecosystems*. Roma, Italia: FAO.
25. Pavela, R., Maggi, F., & Benelli, G. (2019). Essential oils as eco-friendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in Plant Science*, 24(5), 356–358.
26. Perry, R. H., & Green, D. W. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7th ed.). McGraw-Hill.
27. Pila Guagua, J. P. (2023). *Diseño de un proceso de obtención de pintura acrílica con efecto impermeabilizante a partir de poliestireno expandido*.
28. PlasticsEurope. (2020). *Plastics—The Facts: An analysis of European plastics production, demand, and waste data*. PlasticsEurope Report.
29. Poletto, M., Dettenborn, J., Zeni, M., & Zattera, A. J. (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste Management*, 31(4), 779-784.
30. Quintero Peña, C. H. (2013). *Reciclaje termo-mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios*.
31. Rothstein-Gutiérrez, E., & Roldán-Villegas, J. C. (2014). *Factibilidad del proyecto de extracción de aceites esenciales de la naranja en Antioquia*.
32. Singh, R., Hui, D., Singh, S., Ahuja, I. P., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422.
33. Smith, M. B. (2013). *Organic Chemistry: Principles and Mechanisms*. Oxford University Press.

34. Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5th ed.). CRC Press.
35. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). (2020). *Marine Plastic Pollution: Impacts and Solutions*. Gland, Suiza: IUCN.