

Recepción: 10.11.2025

Revisión: 30.11.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0007-3233-9841>

<https://orcid.org/0009-0007-2879-9570>

<https://orcid.org/0000-0002-1252-0527>

USO DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES

USE OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) PRODUCTION WASTE FOR THE MANUFACTURE OF PAVING STONES.

Axel Arath Varela Castelan* ¹
Magín Idelfonso Torreblanca Ramírez ¹
Ignacio Muñoz Máximo ²

¹Facultad de Ingeniería Química,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Ciudad Universitaria,
Jardines de San Manuel,
CP 72570 Puebla, México.

²Laboratorio de Geociencias Aplicadas de la DITCo,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Ciudad Universitaria,
Jardines de San Manuel, CP 72570 Puebla, México.

Correos:

*axel.varela@alumno.buap.mx
magin.torreblanca@correo.buap.mx
ignacio.munozmax@correo.buap.mx

Resumen

Se propone una alternativa técnica y sustentable ante la problemática ambiental derivada de los desechos industriales del EPS, tales como la perla contaminada durante las etapas iniciales del proceso y el polvo fino generado en las líneas de producción. Este residuo, al no ser biodegradable y al tener un alto volumen de producción, representa un desafío en su disposición final; sin embargo, también ofrece un área de oportunidad para su aprovechamiento en materiales de construcción, gracias a sus propiedades térmicas y acústicas. Al utilizar estos residuos y la disolución en solventes compatibles, se emplearon como agregados adicionales en morteros de concreto para la elaboración de adoquines de jardín. El uso de diferentes solventes comerciales según su compatibilidad. El solvente utilizado fue el d-limoneno como la mejor opción, y gasolina por su baja accesibilidad, asimismo, se seleccionaron agregados alternativos que también forman parte de residuos industriales como: grava, sílica y garnet, materiales que ofrecen una buena dureza y baja porosidad. Se siguieron normas ASTM e ISO para ensayos de compresión, absorción de agua y durabilidad, así como adaptaciones de estas normas en otros materiales para pruebas complementarias en los adoquines.

Palabras clave: Adoquines, D-limoneno, poliestireno expandido (EPS), reciclaje de plásticos, residuos industriales.

Abstract

A technical and sustainable alternative is proposed to address the environmental problems caused by EPS industrial waste, such as the beads that become contaminated during the initial stages of the process and the fine dust generated on production lines. This waste, which is not biodegradable and is produced in large volumes, poses a challenge in terms of its final disposal; however, it also offers an opportunity for use in construction materials thanks to its thermal and acoustic properties. By using this waste and dissolving it in compatible solvents, it was used as an additional aggregate in concrete mortar for the production of garden paving stones. Different commercial solvents were used according to their compatibility. The solvent used was d-limonene as the best option, and gasoline due to its low accessibility. Alternative aggregates that are also part of industrial waste were selected, such as gravel, silica, and garnet, materials that offer good hardness and low porosity. ASTM and ISO standards were followed for compression, water absorption, and durability tests, as well as adaptations of these standards to other materials for complementary tests on the paving stones.

Keywords: Paving stone, D-limonene, expanded polystyrene (EPS), plastic recycling, industrial waste.

Introducción

La gestión de residuos sólidos urbanos es un desafío ambiental global, destacando el poliestireno expandido (EPS) debido a su gran volumen de producción y su difícil degradación, lo que provoca contaminación en suelos y cuerpos de agua (Andrady, 2015; Hopewell et al., 2009). Aunque el poliestireno expandido (EPS) ofrece buenas propiedades, su carácter no biodegradable y la generación de residuos industriales – perlas contaminadas, scrap y polvo de poliestireno – representan un problema ambiental significativo (Awaja & Pavel, 2005).

Varias investigaciones han demostrado que la disolución del poliestireno expandido en solventes orgánicos permite su transformación en productos de valor agregado, aunque la elección de los solventes y la viabilidad técnica de los productos siguen siendo retos importantes (Al-Salem et al., 2009). En este estudio se propone utilizar los desechos generados en las etapas de producción del poliestireno expandido disueltos con solventes orgánicos como agregados en adoquines, evaluando su factibilidad técnica y ambiental, generando un producto de valor agregado para la industria de la construcción, cumpliendo con normas de desempeño y criterios de sostenibilidad.

El objetivo principal es desarrollar y evaluar la reutilización del polvo y perlas contaminadas de poliestireno en adoquines para jardinería o decorativos, analizando su resistencia mecánica, absorción de agua y estabilidad frente a condiciones climáticas externas, reduciendo la generación de residuos industriales ofreciendo soluciones constructivas sostenibles.

Identificación y caracterización del solvente, agregados y aditivos

La naturaleza apolar del poliestireno exige solventes poco polares para su disolución. En la evaluación realizada, el d-limoneno destacó por su eficiencia y menor riesgo ambiental, mientras que la gasolina, aunque económica y

efectiva, presentó mayores peligros operativos. Por ello, el d-limoneno se seleccionó como solvente principal y la gasolina como alternativa.

En cuanto a los agregados, se eligieron materiales provenientes de desechos industriales. El garnet y la grava de sílica aportaron alta dureza, estabilidad y buena compatibilidad con la matriz cementicia. Además, se incorporó polvo de poliestireno como agregado ligero en proporciones superiores al 5 % del peso del cemento para valorizar este residuo.

Pruebas de densidad aparente

Se determinó la densidad del polvo de poliestireno y la perla contaminada mediante probetas de 10 ml, pesadas con balanza analítica, tomando como referencia la norma ISO 697-1.

Tabla 1. Datos experimentales de la perla contaminada y el polvo de poliestireno para la determinación de su densidad aparente.

Parámetro	Polvo de poliestireno	Perla contaminada	Unidad
Masa de polvo de poliestireno (m)	a) 5.4650 b) 5.4652 c) 5.4649	a) 6.2465 b) 6.2462 c) 6.2460	g
Volumen de la probeta de medición (V)	10	10	ml
Densidad aparente calculada (ρ)	a) 0.54650 b) 0.54652 c) 0.54649	a) 0.6246 b) 0.6246 c) 0.6246	g/ml
Densidad promedio	0.5465	0.6246	g/ml

Nota. Elaboración propia

El valor de la densidad aparente para el polvo de poliestireno fue 0.5465 g/ml en comparación con la perla contaminada 0.6246 g/ml el polvo representa un valor menor de densidad, la diferencia puede deberse a la morfología de las partículas, así como del grado de compactación del material dentro de la probeta.

Cálculo de proporciones y preparación de mortero

Se establecieron relaciones polímero–solvente de 1:1 a 1:3 para obtener una viscosidad adecuada. La disolución del polímero se incorporó manualmente a una mezcla de cemento, agregados finos y gruesos y agua.

Con esta mezcla se elaboraron probetas cilíndricas conforme a ASTM C39 (15 × 30 cm), las cuales se curaron 28 días bajo saturación controlada.

Los cálculos en Excel se organizaron a partir de volúmenes, masas y proporciones de disolución, ajustando la cantidad de solvente y el volumen final de mortero. Cuando se añadió un aditivo en polvo (2–5 % del peso del cemento), se modificó la relación agua–material.(Tabla 2)

El peso estimado del adoquín se obtuvo calculando la densidad global de la mezcla a partir de los volúmenes y densidades individuales. El d-limoneno presentó una densidad de 0.7671 g/mL, utilizada como referencia para estimar las cantidades iniciales de solvente y polímero. Con el volumen de la pieza y la densidad total, se estimó un peso de 11.7806 kg, con el cual se definieron las cantidades necesarias de cada componente. (Tabla 3,4,5)

Se elaboraron también tres probetas adicionales empleando gasolina disuelta con perlas contaminadas de poliestireno, aplicando la misma metodología y modificando únicamente los datos del solvente y el polímero.



Figura 2. Identificación de probetas para prueba ASTM C39
Nota. Elaboración propia

Tabla 2. Proporciones estándar para la fabricación del mortero.

Proporciones	[Kg]
Cemento	1
Garnet	2
Grava sílica 1/8	3
Mezcla polímero/solvente	0.15
Agua	0.6
Colorante	0.035
Total	6.75

Nota. Elaboración propia

Tabla 3. Cálculo para determinar la densidad total de la mezcla.

Densidad [g/ cm ³]	Material	Volumen [cm ³]	Masa total	Volumen Total [cm ³]	Densidad promedio
3.15	Cemento	317.4603	6.75	3182.7499	2.1188
2.4	Garnet	833.3333	6750		
2.5	Grava sílica 1/8	1200			
1	Agua	600			
0.648	Mezcla polímero/solvente	234.9562			
0.5465	Polímero	239.4	262	410.4	0.638
0.75	Gasolina	171			

Nota. Elaboración propia

Tabla 4. Determinación para las cantidades de polímero/solvente de acuerdo con la relación

Mezcla polímero/solvente		Relación 1:1.4
Densidad del polímero	0.5465	g/ml
Densidad solvente (gasolina)	0.7671	g/cm ³
Cantidad solvente	171	ml
Peso D-limoneno	131.1741	gr
Cantidad de polímero	239.4	ml
Peso del polímero	130.8321	gr
Peso total	262	gr

Nota. Elaboración propia

Tabla 5. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	11.7806	kg	11780.5853	gr
Cemento	1.7453	kg	1745.2719	gr
Garnet	3.4905	kg	3490.5438	gr
Grava sílica 1/8	5.2358	kg	5235.8157	gr
Mezcla polímero/solvente	0.2618	kg	261.7907	gr
Colorante	-	kg	-	gr
Agua	1.0472	L	1047.1631	ml

Nota. Elaboración propia

Pruebas de compresión

La norma ASTM C39 requiere que las probetas se encuentren en un estado de humedad controlada, con la superficie seca, pero con saturación interna previa al ensayo. Para cumplir esta condición, dos de las probetas se sumergieron en agua durante 15 minutos antes de aplicar la carga. Posteriormente, cada probeta fue ensayada bajo carga axial constante en una máquina universal CMSUTM-600B hasta alcanzar el fallo mecánico, registrándose la carga máxima soportada.

Tabla 6. Resultados carga-desplazamiento

Probeta	Carga máxima [kN]	Desplazamiento máximo [mm]
(1) Polvo + D-limoneno	252.05	12.6
(2) Polvo + D-limoneno	132.95	30.1998
(3) Polvo + D-limoneno	143.17	14.35
(1) Perla + gasolina	247.48	23.2499
(2) Perla + gasolina	132.53	7.95
(3) Perla + gasolina	140.26	13.5

Nota. Elaboración propia

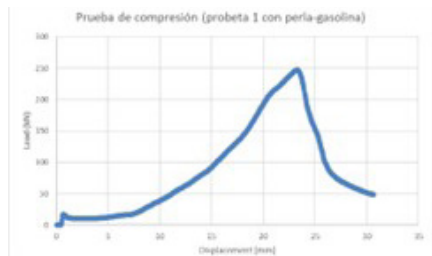
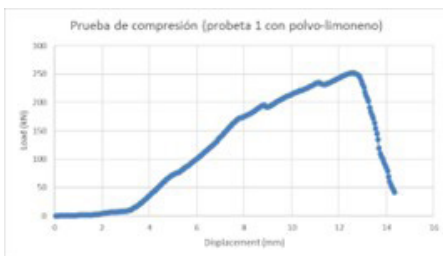
Se compararon las probetas elaboradas con polvo de poliestireno y con perla contaminada, para evaluar su resistencia a compresión respecto al valor de referencia de 24.5 MPa. La resistencia media de las seis probetas fue de 9.88 MPa para el desempeño mecánico moderado. Considerando únicamente las probetas (1) con polvo disuelto en d-limoneno y (1) con perla disuelta en gasolina —ambas sometidas al acondicionamiento de humedad indicado por la norma—, la resistencia media obtenida fue de 14.13 MPa.

Tabla 7. Resultados de la resistencia a la compresión de cada probeta

Probeta	Área transversal [m ²]	Resistencia a la compresión [MPa]
(1) Polvo + D-limoneno	0.01767	14.26
(2) Polvo + D-limoneno	0.01767	7.52
(3) Polvo + D-limoneno	0.01767	8.10
(1) Perla + gasolina	0.01767	14.00
(2) Perla + gasolina	0.01767	7.50
(3) Perla + gasolina	0.01767	7.93

Nota. Elaboración propia

Figura 3. Graficas carga-desplazamiento



Nota. Elaboración propia

Ensayos de resistencia a cambios climáticos

Se elaboraron adoquines de geometría hexagonal (5 cm por lado y 4.5 cm de altura) se utilizó una mezcla homogénea de polímero disuelto y

pigmento. Tras 28 días de curado, se sometieron a ciclos térmicos acelerados en una cámara PV1200, con variaciones de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y

control de humedad. Estos ciclos, que incluyeron fases de calentamiento, enfriamiento y estabilización, permitieron evaluar su durabilidad térmica bajo condiciones simuladas de exposición real. (Figura 1)

Se introdujo un primer adoquín a la cámara de cambios climáticos, después de 4 días dentro de la cámara el adoquín presentó una anomalía que provocó que la prueba se detuviera, se notó la presencia de burbujas superficiales que salían de dentro del adoquín. (Figura 4)

Las burbujas esféricas observadas inicialmente sugieren una reexpansión o volatilización parcial de fracciones de gasolina atrapadas en el poliestireno, movilizadas térmicamente bajo ciclos extremos. También podrían originarse por una compactación insuficiente o por una mezcla poco homogénea entre el polímero y el solvente, generando vacíos que se expanden a altas temperaturas y se rigidizan al enfriarse.

Para confirmar el comportamiento del material, se ensayó un segundo adoquín con las mismas proporciones en la cámara PV1200, capaz de reproducir el protocolo de la norma ISO 16752-4. El adoquín estuvo en exposición durante 15 días, completando 30 ciclos de 12 horas.

Tras la inspección visual se observó:

- Sin grietas ni fisuras
- Sin cambios de coloración.
- Sin disgregación ni desprendimiento.
- Geometría estable.
- Sin migración del poliestireno.
- Pérdida de masa del 4.37 % (de 704.3 g a 670.1 g).

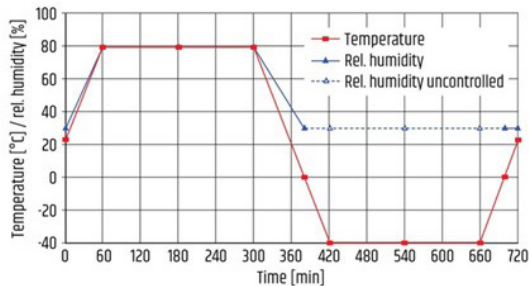


Figura 1. Ciclos de ensayo mediante PV1200

Nota: Volkswagen PV1200 Standard - Análisis de Ascott

<https://www.pv1200.com/>

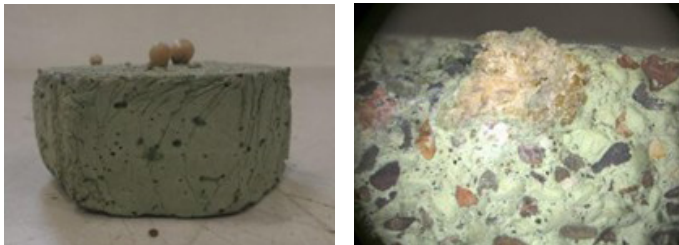


Figura 4. Presencia de burbujas en el adoquín después de 4 días de prueba en cámara de cambios climáticos.

Nota. Elaboración propia

Ensayo de absorción de agua

Los adoquines se secaron en un horno entre 100 y 115 °C durante 24 h hasta alcanzar una masa constante. Posteriormente, se sumergieron en agua a temperatura ambiente durante 24 h para determinar la absorción y la porosidad del material. Para el cálculo de estos parámetros se registró el peso inicial en seco, el peso

saturado en agua y el peso en condición de saturación superficial seca.

Con los datos obtenidos (véase tabla 8) se calculó el porcentaje de absorción de agua, la densidad aparente seca y la densidad en estado saturado superficialmente seco.

Tabla 8. Datos experimentales de la prueba de absorción de agua ASTM C140

Etapa	Tiempo	Temperatura [°C]	Peso [g]
Peso inicial	-	23	670.1
Horno (24 h)	24	110	644.58
+ 2h	26	110	645.04
+ 2h	28	110	644.80
+ 2h	30	110	646.86

Nota. Elaboración propia

Tabla 9. Resultados del ensayo de absorción de agua

Absorción (%)	Densidad aparente seca	Densidad en estado saturado seco
9.29	1.823 g/cm ³	1.993 g/cm ³

Nota. Elaboración propia

Para la resistencia al impacto de material (adoquín)

Se evaluó la resistencia al impacto mediante un ensayo de caída de bola adaptado de las normas ASTM D4272 y EN ISO 13036-5. Se utilizó una bola de acero templado de 833 g, liberada desde 0.70 m sobre una superficie rígida y no absorbente. La energía de impacto calculada fue de 5.714 J. Se aplicaron seis impactos distribuidos sobre la superficie del adoquín y ninguno produjo daño estructural; únicamente se observó una ligera marca superficial sin formación de grietas ni fisuras, reportando adecuada capacidad de absorción de energía. El desgaste por abrasión se determinó siguiendo las normas ASTM C944, ASTM C779/C779M y UNE-EN 1338 (Anexo D), empleando una lija de carburo de silicio para evaluar la pérdida de masa del adoquín bajo condiciones normalizadas de abrasión.

Superficie del ensayo rígida, no absorbente

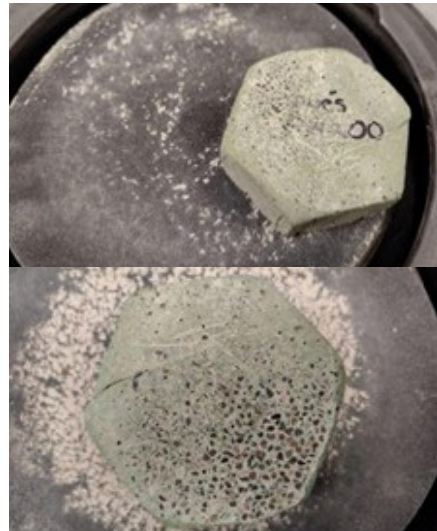


Figura 5. Adoquín después de 500 ciclos de lijado

Nota. Elaboración propia

La pérdida de masa promedio fue de 1.08 gramos lo que representa un 0.16% de pérdida total global de toda la pieza, este valor es relativamente bajo para un adoquín que fue expuesto a cambios climáticos extremos.

Criterios derivados de la norma UNE-EN 1338, Anexo D, el porcentaje obtenido se encuentra por debajo del 1% sugerido como límite para pavimentos de concreto en aplicaciones no industriales.

Se realizó un análisis visual de un fragmento del adoquín con el propósito de evaluar la calidad microestructural de la matriz solvente-polímero-cemento. El examen se enfocó en identificar defectos potenciales —vacíos, porosidad excesiva, fisuras o segregación del polímero— que pudieran afectar el desempeño mecánico del material. Este análisis permitió valorar la integridad de la interfaz y la uniformidad en la integración de los componentes.

Tabla 10. Condiciones para la prueba de abrasión por fricción

Parámetro	Valor
Tipo de abrasivo	Lija de carburo de silicio, grano #80
Tipo de equipo	Plataforma rotatoria
Velocidad de rotación	300 rpm
Duración del ensayo	100 segundos (equiv. 500 ciclos)
Carga aplicada	Presión controlada manualmente
Condición de la muestra	Secada a 105 °C durante 24 horas
Medio de fricción	Seco (sin lubricación)

Nota. Elaboración propia

Tabla 11. Resultados del ensayo de abrasión

Ensayo	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida porcentual	Observaciones
1	673.5	672.42	1.08	0.160%	Leve opacidad superficial, sin exposición del polímero visible
2	672.42	670.98	1.44	0.214%	Zonas de desgaste visibles
3	670.98	670.26	0.72	0.107%	Textura porosa

Nota. Elaboración propia

Imagen microscópica a una magnificación x5.

A 5×, la matriz cementante pigmentada se observó continua, con agregados (grava sílica y garnet) distribuidos uniformemente y bien

anclados. Solo se identificaron poros aislados de forma redondeada, sin evidencia de segregación del polímero.

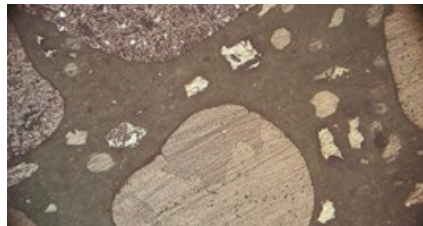
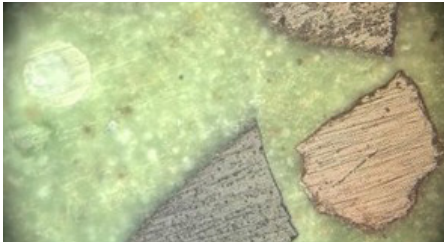


Figura 6. Microestructura de la matriz polímero/sovente-cemento en un aumento x5 Nota. Elaboración propia

Imagen microscópica a una magnificación x20

A 20×, la interfaz cemento-polímero fue continua y sin desadherencias, con una compactación



densa y partículas de garnet sin microfracturas. No se detectaron restos de polímero sin disolver.

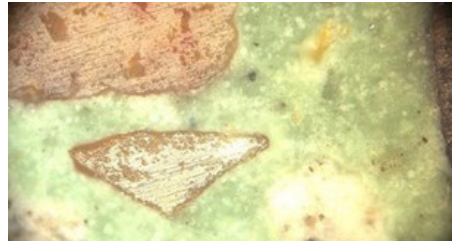
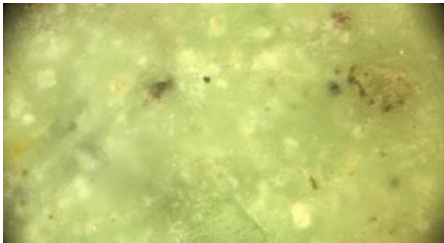


Figura 7. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x20

Nota. Elaboración propia

Imagen microscópica a una magnificación x50

A 50×, se visualizaron partículas de pigmento encapsuladas sin afectar la continuidad de la



matriz. No se observaron microfisuras, indicando una buena calidad Microestructural.

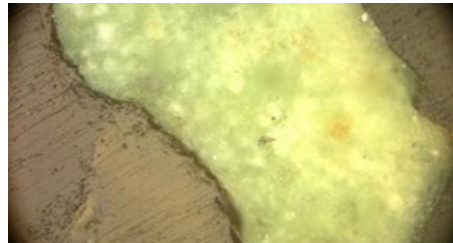


Figura 8. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x50

Nota. Elaboración propia

La resistencia química de los adoquines se evaluó conforme a la norma ASTM C267-20, exponiendo las muestras durante 7 días a tres agentes: ácido clorhídrico al 5 %, hidróxido de sodio al 5 % y cloruro de sodio al 3.5 %. Este ensayo permitió valorar su estabilidad mecánica, química y superficial frente a ambientes agresivos.

Tras las 168 horas de exposición, las probetas se lavaron con agua desionizada y se dejaron secar durante una hora. Las soluciones no se renovaron durante el ensayo, y únicamente el ácido clorhídrico se mantuvo cubierto para

minimizar su volatilidad. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas y dentro de una campana de extracción para garantizar seguridad experimental.



Figura 9. Ensayo de resistencia química durante 7 días

Nota. Elaboración propia

Tabla 12. Resultados de pérdida de masa

Solución	Peso inicial (g)	Peso final (g)	m (g)	m (%)
HCl 5%	114.7508	92.6001	-22.1507	-19.3033%
NaOH 5%	93.9210	90.7396	-3.1814	-3.39%
NaCl 3.5%	167.0297	165.9024	-1.1273	-0.67%

Nota. Elaboración propia



Figura 10. Muestras del ensayo química transcurridos los 7 días

Nota. Elaboración propia

El fragmento expuesto a HCl al 5 % presentó el mayor deterioro, con una pérdida de masa del 19.3 %, desmoronamiento estructural y formación de depósitos sólidos, evidenciando un daño severo en la cohesión. Este comportamiento se explica por los mecanismos clásicos de ataque ácido en materiales cementicios: disolución de la portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], descomposición del gel C-S-H —responsable de la resistencia mecánica— y lixiviación del calcio estructural. La combinación de estos procesos genera una matriz altamente porosa e incapaz de mantener unidos los agregados.



Figura 11. Muestra deteriorada por HCl

Nota. Elaboración propia

En la solución de NaOH al 5 %, la pérdida de masa fue significativamente menor (3.39 %) y no se observaron daños visibles, lo que sugiere que el medio alcalino afecta principalmente de forma superficial. Finalmente, la muestra expuesta a salmuera al 3.5 % mostró la menor pérdida de masa (0.67 %) y ausencia total de deterioro estructural.

En conjunto, los resultados indican que los adoquines son altamente vulnerables en ambientes ácidos, tolerantes en medios alcalinos y estables frente a condiciones salinas o marinas.

Preparación de adoquines final y evaluación económica

Se fabricaron adoquines hexagonales de 8 cm de lado y 5 cm de altura. Se ajustaron proporciones según ensayos previos para garantizar propiedades óptimas, se evaluó el costo de producción incluyendo solventes, materiales, energía y mano de obra.

Se comparó con adoquines tradicionales considerando eficiencia y sostenibilidad

permitiendo identificar la viabilidad técnica y económica del uso de los residuos generados en líneas de producción del poliestireno expandido (EPS).

Para la elaboración de los adoquines finales se optó por utilizar una relación polímero – solvente de 1:1.(Tabla 13, 14)

La comparativa económica de adoquines de concreto hexagonales fabricados a partir de elementos reciclados, particularmente polvo de estireno o perla contaminada disuelto en gasolina o D-limoneno contra 5 marcas de adoquines tradicionales disponibles en México.

El adoquín experimental tiene un costo unitario de 40-50% en comparativa con alternativas comerciales, en cuestión de costos por m² este valor se triplica en comparación a las demás alternativas debido a las dimensiones de cada adoquín, la resistencia mecánica propuesta es suficiente para usos en jardinera y decoración que no requieran soportar grandes cargas continuas, siendo inferior a un concreto estándar estructural >20 MPa.

Su absorción de agua supera lo ideal (<7%), pero está dentro de lo permisible para aplicaciones no estructurales como decorativo, paisajismo y senderos peatonales de baja carga, que de acuerdo con Neville (2011) es de ≤10-12%.

Tabla 13. Determinación para las cantidades de polímero/solvente de acuerdo con la relación

Mezcla polímero/solvente		Relación 1:1
Densidad del polímero	0.5465	g/ml
Densidad solvente (gasolina)	0.75	g/cm ³
Cantidad solvente	30.5	ml
Peso Gasolina	22.875	gr
Cantidad de polímero	30.5	ml
Peso del polímero	16.6682	gr
Peso total	39.5433	gr

Nota. Elaboración propia

Tabla 14. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	1.7635	kg	1763.5188	gr
Cemento	0.2613	kg	261.3	gr
Garnet	0.5225	kg	522.5	gr
Grava silica 1/8	0.7838	kg	783.8	gr
Mezcla polímero/solvente	0.0392	kg	39.2	gr
Colorante	-	kg	-	gr
Agua	0.1568	L	156.8	ml

Nota. Elaboración propia

Tabla 15. Evaluación comparativa

Propiedad	Experimental	Superblock	Tabicel (Venecia)	Preconcretos (AR-8)	Verdecreto	Dublock
Dimensiones	8x14x5 Hexagonal	15X15X6 Cuadrado	20x10x6 Rectángulo	20x10x6 Rectángulo	20x10x6 Rectángulo	20x10x6 Rectángulo
Resistencia a la compresión	14.13 MPa	29.4 MPa	39.2 MPa	15 MPa	24.5 MPa	19.6 MPa
Absorción de agua	9.29%	-	-	<8%	25.5%	-
Densidad aparente seca (g/cm ³)	1.823	-	-	-	1.7	-
Costo unitario	\$20	\$22	\$18	\$21	\$17	\$20
Costo por m ² estimado	\$1869	\$265.0	\$216.4	\$252.5	\$204.5	\$240

Nota. Elaboración propia

Conclusiones

A través de estas mezclas de materiales orgánicos y materiales comerciales se permite tener y ofrecer nuevos materiales, empleando los residuos generando una nueva disposición y uso e incrementando la vida útil de materiales residuales.

Los resultados muestran que los residuos de poliestireno expandido —tanto en polvo como en perlas contaminadas— pueden integrarse adecuadamente en morteros junto con agregados no convencionales como grava sílica y garnet, ambos provenientes de desechos industriales. Los adoquines obtenidos alcanzaron una resistencia media de 14.3 MPa, dentro del rango de materiales decorativos no estructurales según normas como la NTG 41017 (Clase C), adecuados para senderos y jardinería, aunque por debajo de los 35 MPa requeridos por ASTM C936 para pavimentos estructurales.

La absorción de agua fue de 9.29 %, superior al límite de 7 % para adoquines estructurales (NMX-C-414-ONNCCE), pero dentro del rango

permitido para uso decorativo según UNE EN 1338 (≤ 12 %). El desempeño térmico fue estable durante 30 ciclos de -40 °C a 80 °C, indicando buena resistencia a choques térmicos y confirmando la compatibilidad entre el cemento, los agregados minerales y el polímero disuelto.

En términos ambientales y económicos, la propuesta permite valorizar residuos plásticos y minerales de difícil disposición, con potencial de escalamiento industrial. En conjunto, estos resultados respaldan el uso de estos adoquines en aplicaciones urbanas y de paisajismo donde no se requiera capacidad estructural elevada.

El procedimiento que se plantea en este artículo resulta prometedor para ser implementado en pruebas con diversos materiales como lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y alternativas de concreto de alta resistencia, lo anterior permitirá establecer un antecedente de innovación y caracterización en la búsqueda de uso a materiales residuales o invasores

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Los autores se descargan de responsabilidad (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (*ChatGPT, COPILOT, etc.*) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Química y al Laboratorio del área de Geociencias aplicadas DITCo de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Referencias

- Agilent Technologies. (2023). Applications in polymeric materials. Recuperado de [agilent.com](https://www.agilent.com)
- American Concrete Institute (ACI). (2019). Concrete paving unit standard practices. Detroit, MI: ACI Publications.
- ASTM International. (1999). ASTM C39/C39M-99: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- ASTM International. (2025). ASTM C944: Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting. ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM C140: Standard methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. ASTM International.
- ASTM International. (2020). ASTM C39/C39M-99: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- ASTM International. (2021a). ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International.
- ASTM International. (2019). ASTM C779/779M-19: Standard Test Method for Abrasion Resistance of horizontal Concrete Surfaces. ASTM International.
- ASTM International. (2010). ASTM D4272-10: Standard Test Method for Impact Resistance of ThermoSet Laminates. ASTM International.
- ASTM International. (2020). ASTM C267-20: Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars. ASTM International.
- ASTM International. (2012). ASTM C944/C944-99: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortars Surfaces by the Rotating-Cutter Method. ASTM International.
- UNE-EN 1338. (2004). Concrete paving blocks – Requirements and test methods. Asociación Española de Normalización
- Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10a ed.). Wiley.
- Cerablast. (s. f). Arena de granate (garnit)-Cerablast. Recuperado de <https://cerablast.com/es/arena-de-granate-garnit7>
- CEmix. (s. f). Ficha técnica color para cemento. CEMIX
- CTS Clima Temperature System GmbH. (2022). Operating manual – Climate test chamber PV1200. CTS GmbH.
- Gaggino, R., & López, M. A. (2019). Reutilización de residuos plásticos en materiales de construcción: Estado del arte y análisis comparativo de la Construcción, 18(2), 278-291. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.278>
- García, J., & Pérez, M. (2021). Innovación en materiales para pavimentos urbanos. *Journal of Urban Engineering*, 35(2), 123-134.
- González, L., & Torres, P. (2021). Estudio de la resistencia mecánica en adoquines reforzados con EPS. *International Journal of Civil Engineering*, 29(3), 63-70.
- Hamis, S. H. (Ed.). (2000). *Handbook of polymer degradation* (2a ed.). Marcel Dekker.
- Herrera, J., & Muñoz, A. (2020). Innovación en materiales de construcción: Uso de poliestireno expandido en adoquines de concreto. *Journal of Sustainable Construction*, 19(2), 42-50.
- Hormipisos. (s. f). Adoquines: Elegancia duradera en cada paso. Recuperado de <https://www.hormipisos.com>
- ISO. (2010). ISO 16750-4: Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – part 4: Climatic loads. International Organization for Standardization.
- ISO 697-1. (1981). Rubber, raw – Determination of density – Part 1: General test method. Geneva: International Organization for Standardization.
- Idesa Petroquímica - Perla de EPS. (s. f). Recuperado de <https://www.idesapetroquimica.com/es>
- Jones, L., Smith, R., & Taylor, P. (2020). Recycled materials in paving systems. *Construction Materials Review*, 28(4), 89-97.

- Jones, M. R., Waghorn, R., & Soutsos, M. N. (2020). Use of EPS waste in concrete and construction materials. *Construction and Building Materials*, 234, 117293.
- Kumar, V., Gupta, S., & Rao, A. (2021). Utilization of expanded polystyrene in concrete paving blocks. *Sustainable Construction Research*, 19(3), 67-75.
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2a ed.). CRC Press.
- Medina, C., de Rojas, M. I. S., & Frías, M. (2016). Reuse of ceramic waste in eco-efficient concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 399-406.
- Metha, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4a ed.). McGraw-Hill Education.
- Méndez, J., Silca, T. (2022). Resistencia y degradación de adoquines de EPS en entornos externos. *Building and Environment Journal*, 28(3), 89-95.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10a ed.). Wiley
- Mynt, S., Zakaria, M. S. B., & Ahmed, K. R. (2010). Paints based waste expanded polystyrene. *Progress in Rubber, Plastic and Recycling Technology*, 26(1), 21-30. <https://doi.org/10.1177/147776061002600120>
- NAPCOR. (2021). *Expanded polystyrene recycling – A review of methods and applications*. National Association for PET Container Resources.
- Neville, A. M. (2011). *Propertires of concrete* (5a ed.). Pearson Educational Limited.
- ONNCE. (2010). NMX-C-263-ONNCE: Determinación de masa específica, absorción y vacíos. ONNCE.
- ONNCE. (2013). NMX-C-036-ONNCE: Compresión de adoquines. ONNCE