



Benemérita Universidad Autónoma De Puebla

Facultad de Ingeniería Química

Colegio de Ingeniería Química



Uso de residuos producto de la producción de poliestireno expandido
(EPS) para la fabricación de adoquines.

Fecha de presentación: 10/25

Tesis

Para obtener el título de:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Presenta:

Varela Castelán Axel Arath

Director: Magín Idelfonso Torreblanca Ramírez

Índice

Resumen.....	4
Planteamiento del problema.....	6
Justificación	7
Objetivos.....	8
General.....	8
Particulares.....	8
Capítulo I: Antecedentes.....	9
1. Poliestireno expandido (EPS).....	9
1.1 Propiedades físicas y químicas del poliestireno expandido (EPS).....	10
1.2 Solventes para la disolución de polvo y perla contaminada de poliestireno....	13
1.3 Impacto sobre el medio ambiente	15
1.4 Tecnologías de reciclaje	15
1.5 Pavimentos adoquinados	15
1.5.1 Materiales de fabricación	18
1.5.2 Proceso de producción de adoquines.....	20
1.6 Pruebas mecánicas.....	20
1.7 Puntos de generación de residuo	21
Capitulo II: Metodología.....	22
Identificación y caracterización del solvente adecuado.....	22
Selección de los agregados y aditivos.....	23
Pruebas de densidad aparente.....	25
Cálculo de proporciones para adoquines	26
Elaboración de probetas para pruebas de compresión.....	27
Pruebas de compresión.....	32
Elaboración de adoquines para prueba en cámara PV1200	35
Ensayo de resistencia a la absorción (ASTM C140)	39
Pruebas complementarias	41
Preparación de adoquines finales	45
Evaluación del impacto económico de adoquines con polvo de EPS.....	46
Capitulo III: Resultados y discusiones.....	47

Pruebas de densidad aparente	47
Cálculo de proporciones para adoquines	48
Pruebas de compresión	51
Prueba en cámara PV1200	65
Ensayo de resistencia a la absorción (ASTM C140)	71
Pruebas complementarias	73
Preparación de adoquines finales	80
Evaluación del impacto económico de adoquines con polvo de EPS	83
Discusión	85
Conclusión	87
Bibliografía	88

Resumen

El presente trabajo de tesis que lleva como título “Uso de residuos producto de la producción de poliestireno expandido (EPS) para la fabricación de adoquines” propone una alternativa con enfoque técnico y científico para dar una solución ante el problema ambiental que presenta la acumulación de los desechos sólidos de grado industrial derivados de las líneas productivas del poliestireno expandido, como la perla contaminada y las partículas finas (polvo).

Desde el planteamiento del problema, se muestra que el poliestireno expandido presenta buenas propiedades funcionales dentro de otras áreas de interés, la industria de la construcción es una de las principales áreas donde las características terminas y acústicas del polímero representan una ventaja significativa en la incorporación del polímero en materiales de construcción, además, representa un reto desde un punto de vista ambiental, el correcto uso de este material debido a ser no biodegradable y a el enorme volumen productivo que tiene dentro de la industria petroquímica.

La acumulación de este residuo en todas sus presentaciones desde scrap, perlas defectuosas y polvos suelen terminar en rellenos sanitarios o peor en ecosistemas naturales.

El objetivo principal de esta investigación es explorar una propuesta sustentable para darle un segundo uso a la perla contaminada y el polvo de poliestireno mediante una disolución en solventes que sean altamente compatibles, utilizándolos como parte de un mortero de concreto para elaborar adoquines para jardinería mitigando el impacto ambiental de los residuos generando un producto de valor agregado útil para la industria de la construcción.

Dentro de los elementos calve en la metodología se tiene:

1. Identificación del solvente adecuado: se evaluaron varios disolventes en términos de compatibilidad con el polímero basado en parámetros de solubilidad de Hildebrand y Hansen, toxicidad, costos, punto de ebullición e inflamabilidad. El D-limoneno, por ser de bajo impacto ambiental y seguro en

su manipulación, fue el mejor solvente para trabajar, complementando con gasolina por su bajo costo y disponibilidad.

2. Selección de agregados y aditivos: se propuso usar agregados como garnet y grava silica en lugar de los convencionales grava y arena debido a las buenas propiedades de estos materiales como alta dureza, resistencia a la abrasión y baja porosidad aumentando la resistencia mecánica de los adoquines y su durabilidad, además de ser residuos generados en la industria que pueden ser de utilidad después de cumplir su propósito .
3. Caracterización del EPS y los solventes: se realizaron pruebas de densidad aparente del polvo de poliestireno, de la perla contaminada y del D-limoneno, utilizando metodología basada en la norma ISO 697-1.
4. Diseño y fabricación de probetas y adoquines: se elaboraron moldes cilíndricos y hexagonales para pruebas de compresión y dentro de una cámara cíclica de cambios climáticos extremos siguiendo la normativa ASTM C150, C33, C94 y ACI 555R, se mantuvieron las proporciones del polímero disuelto entre el 5 al 15% del peso del cemento.
5. Evaluación de propiedades mecánicas y físico químicas: Se realizaron ensayos estandarizados de resistencia a la compresión (ASTM C39) y absorción de agua (ASTM C140), así como una prueba frente a cambios climáticos en una cámara PV1200 mediante protocolos revidados de la norma ISO 16750-4.
6. Pruebas complementarias de caracterización estructural y funcional: permitiendo expandir los ensayos aplicados a un adoquín tomando como bases de referencia normas aplicadas a otros materiales como microestructura, caída de bola, abrasión por fricción y resistencia química.
7. Análisis técnico-económico y ambiental: se comparó el costo de producción de adoquines para jardín con polímero disuelto como agregado adicional frente a propuestas convencionales, considerando factores como la cantidad de solvente necesario, energía, costos de los agregados y desempeño técnico, así como el impacto ambiental.

Los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas muestran que estos adoquines elaborados con polvo de poliestireno o perla contaminada disuelta en D-limoneno o gasolina presentan buenas propiedades mecánicas, baja absorción de agua, buena estabilidad estructural y dimensional, así como resistencia al deterioro por ciclos térmicos, incluir el desecho derivado de las líneas productivas del poliestireno expandido no compromete radicalmente la integridad estructural del adoquín para jardín , siempre que las proporciones del mortero y la viscosidad de la mezcla se mantengan controladas.

Planteamiento del problema

Los residuos sólidos urbanos son uno de los problemas más grandes a resolver hoy en día debido a su difícil gestión y manejo, el poliestireno expandido (EPS) es uno de los materiales que se produce en mayor volumen por lo que su consumo es inevitable, este material termina acumulándose en rellenos sanitarios, vertederos y ecosistemas ocasionando la contaminación de suelos y cuerpos de agua.

El poliestireno expandido (EPS) tiene ciertas ventajas como buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico, pero a cambio de un gran problema ambiental, al ser un material no biodegradable tarda cientos de años en degradarse y descomponerse, a nivel industrial empresas petroquímicas y manufactureras producen enormes cantidades de residuos sólidos de poliestireno expandido.

El proceso de fabricación del poliestireno expandido comienza con la pre-expansión de perlas de poliestireno, estas perlas se calientan con vapor de agua entre 80 y 110 grados Celsius, después de la pre-expansión las perlas son almacenadas en silos de 12 a 24 horas con una adecuada ventilación, cuando las perlas son estables se les aplica una segunda etapa de vapor de agua, este proceso genera una segunda expansión formando bloques.

Durante estas etapas existen puntos de generación de residuos derivados del poliestireno expandido, las perlas que no alcanzaron a expandirse uniformemente, las que tuvieron un mal transporte y manipulación y las que se encuentran en silos en condiciones no adecuadas de ventilación puede ser catalogadas como perlas

contaminadas que pasan a ser residuos, el scrap es un material extruido que se puede quedar acumulado en tuberías generando un punto de generación de residuo.

Durante el proceso de calentamiento de las perlas debido a rozamientos, cortes en etapas finales, transportes neumáticos y el almacenamiento en ciclones, se generan residuos de poliestireno expandido en forma de polvo, este polvo de acuerdo con la hoja de seguridad de Styropke indica que la razón de este punto de generación son los ciclones utilizados para la separación de partículas donde se está generando y acumulando el residuo.

Con lo mencionado anteriormente se ha estudiado que la disolución de poliestireno expandido (EPS) en disolventes orgánicos, alcoholes y aceites es una forma viable de reutilizar los residuos de poliestireno expandido transformándolos en productos de valor agregado, mitigando los puntos de generación del scrap, la perla contaminada y el polvo de poliestireno.

Estos estudios plantean otros retos relacionados con la elección y la sostenibilidad del solvente, así como con la viabilidad de los productos resultantes.

Por lo tanto, este estudio evaluará la factibilidad técnica y ambiental en aplicaciones que reduzcan la acumulación de la perla contaminada y el polvo que se genera en líneas de producción a través de la elaboración de adoquines, disolviendo las perlas y el polvo en solventes accesibles para generar alternativas que ayuden a mitigar su acumulación y a su vez ofrecer un producto con aplicaciones reales dentro de la industria de la construcción acorde a estándares y normas alienadas a la evaluación del desempeño y calidad del producto de valor agregado propuesto.

Justificación

El desarrollo documental surge de la necesidad de proponer soluciones para la disposición y gestión de residuos sólidos derivados del poliestireno expandido (EPS) así como de los residuos generados durante su etapa de proceso principalmente del sector industrial.

En México, la Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNART-2001 son las encargadas de regular la gestión de los residuos plásticos, sin embargo, algunas industrias petroquímicas descartan grandes volúmenes de material derivado del poliestireno expandido que queda como residuo en algunas de sus etapas de producción, como el propio EPS, polvos, perlas sin expandir y producto sobre polimerizado.

En respuesta a lo anterior, se propone utilizar estos residuos provenientes del proceso de producción del poliestireno expandido (polvo y perla) en solución con solventes sustentables incorporándolos a la composición de un adoquín convencional, con el fin de obtener materiales útiles para la industria de la construcción mitigando los residuos en líneas de producción del poliestireno expandido (EPS) y cumpliendo con la normativa ambiental vigente.

Objetivos

General

Desarrollar y evaluar propuestas sustentables para la reutilización de polvo y perla contaminada de poliestireno mediante la realización de un estudio teórico y experimental mediante su disolución en solventes adecuados, añadiéndolo como un agregado adicional con el fin de demostrar si es factible o no el uso de agregados reciclados en la fabricación de adoquines decorativos analizando su resistencia mecánica, absorción de agua y estabilidad ante condiciones climáticas extremas.

Particulares

- Estudiar las características de solventes adecuados para determinar la efectividad y accesibilidad en la disolución de polvo de poliestireno y perla contaminada.
- Determinar una metodología para la relación óptima entre solvente y residuo de polvo de poliestireno y perla contaminada y el efecto sobre la composición del concreto, proponiendo el uso de granate en sustitución de arena convencional y grava silica por grava convencional.

- Determinar la eficiencia y propiedades técnicas de los adoquines mediante ensayos de resistencia mecánica (ASTM C39 ensayo de compresión, ASTM C140 ensayo de absorción de agua)
- Someter los adoquines a una prueba dentro de una cámara PV1200 evaluando su resistencia a la degradación y su estabilidad dimensional y geométrica.
- Realizar un análisis técnico-económico y ambiental para la fabricación de adoquines considerando los costos del material, impacto al ambiente y la eficiencia de producción a escala.
- Evaluar la practicidad de los adoquines frente a alternativas comerciales.
- Soporte de información por IA corroborando con documentación oficial facilitando el acceso a fuentes de información.

Capítulo I: Antecedentes

1. Poliestireno expandido (EPS)

El poliestireno expandido (EPS) se forma mediante la polimerización del estireno, su estructura compuesta por pequeñas esferas de aire lo convierten en un material versátil con propiedades únicas (PlasticEurope, 2020).

El proceso de producción del poliestireno expandido (EPS) inicia con su polimerización donde se produce en forma de perlas, estas perlas se expanden y otras no al ser rociadas por un agente soplador generando espuma, mediante este paso la espuma resultante es moldeada mediante calor y presión para obtener la forma deseada (Singh et al., 2017). Esta información fue asistida y organizada con el apoyo de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025).

Durante su proceso de producción, las perlas de poliestireno chocan entre sí, generando fricción y desprendimiento de partículas, durante el calentamiento con vapor, así como durante el transporte de material y en los ciclones utilizados para su separación. Todos esos procesos contribuyen a la generación de partículas acumuladas conocidas como polvo de poliestireno, un residuo que es desechado sin una adecuada gestión (ANAPE, 2011).

El poliestireno expandido (EPS) tiene una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores, en la construcción se utiliza como aislante térmico y acústico, en paredes, techos, pisos y para rellenar huecos, sirve como protección de productos frágiles durante el transporte y almacenamientos, por su ligereza tiene aplicaciones en boyas, salvavidas y dispositivos de flotación además de tener aplicaciones en molduras, cornisas y otros elementos decorativos (Gibson, 2016).

El impacto ambiental del poliestireno expandido es alto debido a que es un material no biodegradable y tarda cientos de años en descomponerse, afectando flora, fauna, los suelos y cuerpos de agua debido a su acumulación en el ambiente.

La producción de este material genera gases de efecto invernadero por lo que se han establecido regulaciones para la reducción de su impacto ambiental (Hopewell et al., 2019). Esta información fue asistida y organizada con el apoyo de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025)

1.1 Propiedades físicas y químicas del poliestireno expandido (EPS)

Los productos terminados elaborados con poliestireno expandido tienen la característica de ser livianos y de fácil manejo debido a la baja densidad del material, la densidad de poliestireno expandido es de 1.04 g/cm^3 (ANAPE, 2011).

La resistencia al estrés mecánico para aplicaciones donde se utiliza EPS como materia prima se evalúan con las siguientes propiedades:

- Fluencia a compresión
- Resistencia a la tracción
- Resistencia a compresión al 10% de deformación
- Resistencia a la flexión (ANAPE, 2011).

El poliestireno expandido (EPS) es un buen aislante acústico absorbiendo el sonido, reduciendo la transmisión del ruido (Gibson, 2016), además tiene una excelente capacidad de aislamiento térmico frente el frío y al calor.

El aire en reposo es un buen aislante térmico y debido a que el 98% del volumen del poliestireno es aire le confiere una capacidad de aislamiento térmico definida

por su coeficiente de conductividad térmica λ , los valores pueden variar dependiendo del tipo de EPS y su densidad mínima, en normas como la ISO 8301 y ASTM C177 existen especificaciones precisas que detallan las propiedades térmicas de los materiales aislantes como el EPS (ANAPE, 2011).

El poliestireno expandido no es higroscópico, es decir, no absorbe agua incluso cuando se expone a grandes cantidades de agua; la radiación ultravioleta hace que la superficie del poliestireno expandido (EPS) se amarillee y se debilite (ANAPE, 2011).

El poliestireno expandido es resistente a la mayoría de los ácidos, bases, sales y agua lo que lo hace duradero y resistente a la degradación (Gibson, 2016).

Sin embargo, ANAPE presenta la siguiente tabla acerca de la estabilidad química del poliestireno expandido (véase la tabla 1).

Tabla 1. Estabilidad química del poliestireno expandido (EPS)

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Solución salina (agua de mar)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensioactivos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Lejías	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácido clorhídrico (al 35%), ácido nítrico (al 50%)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos concentrados (sin agua) al 100%	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Soluciones alcalinas	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Disolventes orgánicos (acetona, esterres,)	No estable: El EPS se contrae o se disuelve

Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Aceites de parafina, vaselina	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceite de diésel	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Carburantes	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Alcoholes (metanol, etanol)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie

Fuente: (ANAPE, 2011)

Disolución de poliestireno expandido con solventes orgánicos

La reacción química de la solución entre el EPS en solventes orgánicos depende de un proceso físico de solubilización, en esta reacción los enlaces covalentes no se rompen y las moléculas del disolvente penetran en la estructura polimérica del EPS, debilitando las fuerzas intermoleculares, como las fuerzas de Van der Waals, que mantienen la cohesión entre las cadenas del poliestireno.

El poliestireno, al estar compuesto mayoritariamente de aire, colapsa y su tamaño y volumen se reducen considerablemente cuando entra en contacto con un disolvente como:

- Acetona
- Tolueno
- Xileno
- D-limoneno
- Gasolina

Estos disolventes generan fenómenos como la dispersión y la solvatación donde las moléculas del solvente rodean las cadenas del polímero.

La interacción química entre el poliestireno expandido se puede representar de la siguiente manera:

Derivado del EPS + Solvente orgánico → Sustancia gelatinosa o líquida

Ecuación 1. Representación de la interacción química del EPS mediante un solvente

La disolución depende del disolvente, como ejemplo la gasolina podría generar liberación de aire (Sperling, L. H, 2005), (Billmeyer, F. W, 1984).

1.2 Solventes para la disolución de polvo y perla contaminada de poliestireno

La teoría de parámetros de solubilidad de Hildebrand dice que un polímero se disuelve en un solvente si las fuerzas de cohesión son similares entre el solvente y el polímero (Hildebrand & Scott, 1962).

El solvente tiene un papel importante en el proceso de disolución del poliestireno expandido, este fenómeno se explica con aspectos termodinámicos dentro de la disolución, el parámetro de solubilidad de Hildebrand es un valor numérico que describe el comportamiento entre el solvente y el polímero.

Para que un polímero sea disuelto con mayor facilidad las diferencias entre estos parámetros deben ser pequeñas, el parámetro de solubilidad del poliestireno es de aproximadamente $9,1 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$, solventes cercanos a este valor serán más efectivos para disolverlo, además de considerar factores como temperatura, polaridad del solvente y el peso molecular del polímero ya que estos factores afectan la solubilidad (Billmeyer, 1984).

La disolución del poliestireno ocurre mediante la solvatación, aquí las moléculas del disolvente rodean y atraviesan las cadenas del polímero, debilitando las fuerzas intermoleculares y dispersando las moléculas en el medio líquido (Young & Lovell, 2011).

Una herramienta para poder predecir qué tan compatible es un solvente con un polímero son los parámetros de solubilidad de Hansen, descomponen la energía de cohesión del material en tres componentes principales:

δ_d : Dispersión

δ_p : Polaridad

δ_h : Capacidad de formar enlaces de hidrógeno (Hasen, 2007).

Los valores aproximados para el poliestireno de los parámetros de Hansen son:

$\delta_d=18.6 \text{ MPa}^{1/2}$, $\delta_p=4.36 \text{ MPa}^{1/2}$ y $\delta_h=2.6 \text{ MPa}^{1/2}$.

Por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos como tolueno o xileno son eficaces para disolver el polvo y la perla contaminada de poliestireno debido a su estructura de anillos bencénicos capaces de interactuar con las cadenas de poliestireno. (Billmeyer, 1984).

Los hidrocarburos alifáticos como hexano o heptano y solventes oxigenados como acetona son capaces de disolver parcialmente cadenas de poliestireno, aunque menos efectivos que los solventes aromáticos (Tang et al., 2015)

Una alternativa ecológica es el uso de D-limoneno, solvente natural extraído de cítricos, cuenta con una estructura similar a la del benceno, lo que permite interacciones con el poliestireno, además de ser biodegradable y menos tóxico (shen & Patel, 2008).

El D-limoneno es menos denso que el agua teniendo una densidad aproximada de 0.84 g/cm^3 a 20°C , tiene un punto de ebullición de 176°C y una viscosidad de 1.3 cP a 25°C lo que permite su fácil manejo (Pavela et al., 2019).

Posee una estructura basada en un anillo con doble enlace conjugado lo que facilita interacciones tipo π - π con los anillos fenilo del poliestireno, sus parámetros de Hansen son: $\delta_d=16.3 \text{ MPa}^{1/2}$, $\delta_p=1.8 \text{ MPa}^{1/2}$ y $\delta_h=4.36 \text{ MPa}^{1/2}$ (Speight, 2014).

Gasolina

Mezcla de hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos, tiene una densidad entre 0.7 a 0.8 g/cm^3 , cuenta con un punto de ebullición de 30°C a 200°C , tiene una baja viscosidad de 0.5 cP a 20 cP lo que permite su fácil manipulación y su uso como solvente (Speight, 2014).

Una forma de identificar esta compatibilidad entre solvente y polímero es el parámetro Ra (distancia de Hansen) este parámetro permite expresar cuantitativamente la compatibilidad.

1.3 Impacto sobre el medio ambiente

El poliestireno expandido, al degradarse, puede verse fragmentado en micropartículas que pueden terminar en las cadenas alimenticias de los ecosistemas, así como en los suelos naturales provocando efectos negativos en la vida silvestre (Geyer et al., 2017). Esta información fue asistida y organizada con el apoyo de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025).

1.4 Tecnologías de reciclaje

El reciclaje mecánico del poliestireno expandido implica un proceso de trituración o molienda del material y utilizarlo como agregado, relleno o materia prima para la fabricación de nuevos productos que van desde marcos decorativos, molduras y hasta paneles aislantes (Myint et al., 2010).

El reciclaje químico implica la descomposición del poliestireno expandido (EPS) mediante un proceso de despolimerización o craqueo controlado para romper las cadenas macromoleculares del EPS, obteniendo sus componentes originales para reutilizarlo en la fabricación de nuevos plásticos (Idesa Petroquímica, s.f.).

El reciclaje térmico implica convertir el poliestireno expandido en compuestos de bajo peso molecular mediante pirólisis, aplicando altas temperaturas en ausencia de oxígeno obteniendo hidrocarburos líquidos utilizados como combustible o materia prima para la industria petroquímica (López & Cánepa, 2013). Esta información fue asistida y organizada con el apoyo de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025).

1.5 Pavimentos adoquinados

Los adoquines han sido utilizados como pieza fundamental desde la antigüedad como elementos de construcción y pavimentación, civilizaciones como la egipcia y, posteriormente, la romana, construyeron caminos duraderos y resistentes utilizando piedras talladas para su construcción, durante el Imperio Romano se perfeccionó la

técnica de pavimentación, destacando la innovación del uso de piedras volcánicas de alta resistencia permitiendo que la Vía Appia (véase ilustración 1) perdurara con el tiempo conservando parte de su estructura original.

Durante la Edad Media, los caminos y plazas urbanas comenzaron a mejorar tomando los cimientos de otras civilizaciones lo que permitió mejorar la infraestructura vial expandiéndose en el desarrollo urbano (Steen & Smith, 2019).



Ilustración 1. Vía Appia a Rome

Los adoquines actuales han cambiado a través del tiempo, desde su composición hasta su diseño, entre sus usos se encuentran calles, plazas, proyectos de paisajismo y sistemas de gestión del agua para administrar el recurso hídrico de manera eficiente y sustentable, la posibilidad de incorporar elementos poliméricos reciclados ha permitido innovar en materiales extendiendo su funcionalidad en aplicaciones sustentables (García & Pérez, 2021).

Los adoquines son clasificados por diferentes características.

- Clasificación por material

Adoquines de hormigón o concreto: Son los más utilizados debido a su alta resistencia y durabilidad, su preparación implica una mezcla típica de cemento, greda y agregados (finos y gruesos), (Torres, 2020).



Ilustración 2. Adoquines de concreto

Adoquines de piedra natural: Se fabrican a partir de rocas como granito, basalto o arenisca, tienen alta resistencia mecánica y una buena estética natural, son costosos de elaborar (Torres. 2020).



Ilustración 3. Adoquín de piedra natural de Mosqueruela

Adoquines de arcilla cocida: Fabricados a partir de la cocción de arcilla, buena resistencia a temperaturas muy bajas y gran durabilidad, no son capaces de soportar cargas vehiculares pesadas (Torres,2020).



Ilustración 4. Adoquín de arcilla cocida

Adoquines de material reciclado: Incorporan material como vidrio, caucho, ceniza, fibras o poliestireno reciclado como parte de los agregados (Torres, 2020).



Ilustración 5. Adoquín de material reciclado

- Clasificación por forma y diseño

Rectangulares: Diseño tradicional y más usado por su versatilidad y fácil instalación.

Inter trabados: Diseños que favorecen un encaje perfecto entre piezas.

Irregulares: Creados para acabados estéticos en áreas recreativas o residenciales (Torres, 2020).

1.5.1 Materiales de fabricación

Un adoquín contiene una porción de 1 parte de cemento Portland, 2 partes de arena y 3 partes de grava, mezcladas con agua en una proporción controlada, usualmente de 0.5 a 0.6 partes respecto al cemento, de acuerdo con las recomendaciones de la American Concrete Institute (ACI, 2019). Esta proporción de materiales asegura una mezcla con buena resistencia y durabilidad al desgaste frente a condiciones climáticas. Esta información fue asistida y organizada con el apoyo de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025).

Los agregados derivados del poliestireno expandido, como el polvo, pueden diluirse en solventes orgánicos como el d-limoneno o la gasolina en una proporción base de 1 parte de cemento, 2 partes de arena o granate, 3 partes de grava o grava silica, la investigación titulada “Propiedades Físico-Mecánicas de Morteros con Contenido de Poliestireno Expandido (EPS) diluido como Material Aglomerante” evaluó diferentes porcentajes de EPS disuelto en diversos solventes y determino que la adición de EPS en porcentajes del 5%, 10% y 15% relativo al peso del cemento afecta las propiedades mecánicas, reológicas del mortero, dependiendo de la dosificación y del solvente utilizado (Patiño & Reina, 2024). Esta información fue asistida y organizada con el apoyo de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025).

Los agregados convencionales como la grava y la arena pueden ser sustituidos por materiales que agreguen un valor agregado mayor, el uso de grava silica compuesta principalmente por (SiO_2 , dióxido de silicio) en sustitución de la grava convencional muestra ventajas ya que cuenta con una resistencia mecánica mayor con una dureza de aproximadamente 7 en la escala de Mohs y cuenta con una baja

absorción de agua reduciendo la porosidad del concreto, un estudio realizado por Metha y Monteiro (2014) revelo que agregados con alto contenido en cuarzo puede mejorar la resistencia del concreto.

De igual manera el granate es un mineral con una dureza de 6.5 a 7.5 dentro de la escala de Mohs, cuenta con propiedades mecánicas y químicas mejores a los de la arena convencional, su alta dureza permite una mayor resistencia del concreto sobre el desgaste superficial y también reduce la porosidad, Khatib & Hibbert (2005) señalan que los agregados de alta dureza mejoran la durabilidad y resistencia del concreto.

La normativa ASTM y la American Concrete Institute (ACI) especifican proporciones comunes para la elaboración de concretos, a continuación, se muestra una tabla con las proporciones indicadas por normatividad:

Tabla 2. Proporciones para fabricar concreto según la norma ASTM

Material	Cantidad por m ³	Proporción en partes
Cemento Portland (ASTM C150)	300 – 350 kg	1
Agua (ASTM C94)	150 – 180 L	0.5 - 0.6
Arena/ Granate (ASTM C33)	600 – 700 kg	2
Grava/Grava silica (ASTM C33)	900 – 1100 kg	3
Aditivos (ASTM C494)	Variable (0.5 – 2.5% del peso del cemento)	0.05 – 0.25
Material reciclado (ACI 555R)	5 – 30% del peso total	0.05 – 0.3

Estas proporciones son adecuadas para un concreto de 250 kg/cm³ (25 MPa o 3625 psi), (ASTM, 2005).

Si se desea añadir poliestireno expandido reciclado, la ACI 555R-01 sugiere comenzar con 5 – 10% del volumen total de la mezcla y aumentar gradualmente hasta un máximo de 30% dependiendo del tipo de aplicación y las propiedades mecánicas necesarias.

1.5.2 Proceso de producción de adoquines

Para la producción de adoquines se debe dosificar la proporción del material, definir las proporciones del cemento, agregados finos (arena o granate), agregados gruesos (grava o grava silica), agua y aditivos conforme a normativas vigentes (ASTM C150, C33, C94 y C494), se deben mezclar los materiales secos asegurando una distribución uniforme, durante el proceso de mezclado se añade agua para ir generando una mezcla homogénea de concreto. Una vez obtenida la mezcla de los materiales secos, se agrega gradualmente el agua asegurando una buena trabajabilidad y así evitar la saturación de líquido que comprometa la resistencia del concreto. La mezcla final se vierte en moldes vibratorios o prensas hidráulicas para dar forma y compactar el adoquín, eliminando burbujas de aire y dándole buenas propiedades de resistencia al material, los adoquines se extraen del molde y se dejan curar durante un periodo de 7 a 28 días dependiendo del diseño y composición del adoquín, este proceso permite la hidratación completa del cemento, promoviendo el desarrollo de la resistencia mecánica frente a condiciones climáticas adversas (ACI, 2019).

1.6 Pruebas mecánicas

La fabricación de los adoquines viene acompañada de una serie de normas aplicables para ensayos que permiten evaluar sus propiedades mecánicas y de durabilidad, normas como la ASTM C39/C39M establecen procedimientos estandarizados para pruebas de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, aplicable para probetas prismáticas o cúbicas, la norma ASTM C140/C140M describe los procedimientos estándar para la prueba de resistencia a la absorción de agua, la densidad y otras propiedades físicas de unidades de mampostería, incluyendo adoquines, permitiendo cuantificar la resistencia al desgaste del material así como la penetración de humedad (ASTM, 2005).

Prueba dentro de cámara PV1200 sometiendo al adoquín a cambios climáticos extremos yendo desde los -40°C hasta los 80°C a lo largo del tiempo siendo de naturaleza cíclica, estos ensayos simulan condiciones reales de exposición prolongada en exteriores.

Esta cámara se rige bajo la norma ISO 16750-4 que trata sobre ensayos ambientales, para adoquines esta cámara es útil debido a que las normas ISO 16800 “pruebas de materiales para la resistencia a cambios térmicos”, ISO 15148 “pruebas de permeabilidad al agua en materiales de construcción”, UINE-EN 12371 “piedra natural – resistencia al ciclo de congelación y descongelación” y la IEC 60068-2-14 “pruebas ambientales – prueba N: cambios de temperatura” complementando con pruebas de propiedades mecánicas como la compresión y absorción de agua.

Estas normativas, permiten evaluar la durabilidad, estabilidad dimensional, integridad estructural y resistencia física de los adoquines garantizando un buen desempeño a largo plazo en aplicaciones de jardinería.

1.7 Puntos de generación de residuo

Proceso de producción del poliestireno expandido (EPS)

El proceso de producción del poliestireno expandido ocurre mediante la polimerización del monómero de estireno y su posterior expansión con agentes espumantes, el proceso tiene varias etapas en las cuales hay puntos de generación de residuos significativos, como polvos, acumulación de perlas contaminadas y materia prima solidificada.

Durante la pre-expansion la materia prima se somete a un proceso de intercambio de calor con pentano para expandir su volumen entre 20 y 50 veces su tamaño original, en este proceso se pueden encontrar desechos como polvo perlas muy finas, de acuerdo con society of Plastic Engineers (SPE), alrededor del 1-3% de la materia prima se pierde en esta etapa debido al arrastre en el sistema de transporte neumático.

La etapa de estabilización y secado se enfrían las perlas, estas son transportadas a silos para la liberación de agentes de expansión residuales, en este punto se puede encontrar material degradado por exposición prolongada a condiciones ambientales, así como material que no logra la densidad requerida.

Posteriormente se realiza un moldeo primario, en este proceso la materia prima es sometida con calor, de acuerdo con Plastic Waste Management Institute, las fugas del material y los defectos durante el moldeo representan el 5% del desperdicio total (Plastic Waste Report. 2022).

Los bloques solidos de poliestireno expandido se cortan con alambres de altas temperaturas o sierras, debido a los cortes se genera polvo residual y material fuera de especificación.

Las pérdidas durante el proceso de corte pueden ser del 20 al 30% dependiendo de la precisión del equipo (UNIDO Technical Report, 2011).

Capitulo II: Metodología

Identificación y caracterización del solvente adecuado

Para la selección del solvente más adecuado para la disolución de perlas contaminadas y polvo de poliestireno se consideraron criterios fisicoquímicos, operacionales, ambientales entre otros.

El poliestireno tiene un parámetro de solubilidad de $18.6 \text{ MPa}^{1/2}$, solventes con valores cercanos favorecen la disolución.

El poliestireno es un polímero apolar por lo que solventes poco polares o apolares serán más efectivos.

Tabla 3. Comparativa entre solventes

	D-limoneno	Tolueno	Xileno	Acetato de etilo	Diesel	Gasolina
Solubilidad	16.8 [MPa ^{1/2}]	18.2 [MPa ^{1/2}]	18.0 [MPa ^{1/2}]	18.2 [MPa ^{1/2}]	14-16 [MPa ^{1/2}]	14-16 [MPa ^{1/2}]
Punto de inflamación	48°C	4°C	25°C	-4°C	52°C	-40°C
Toxicidad	Baja	Alta	Alta	Media	Media	Alta
Disponibilidad	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta
Costo	Alto	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo

Factores de operación	No requiere condiciones especiales	Necesita ventilación y control de vapores	Necesita ventilación y control de vapores	Se evapora rápido, requiere contención de vapores	Baja volatilidad, más seguro que la gasolina	Altamente volátil y peligroso en espacios cerrados
Punto de ebullición	176°C	110.6°C	138°C	77°C	180-340°C	30-200°C (según fracción)

El tolueno, xileno y la gasolina son buenos disolventes, pero el D-limoneno destaca como la opción más ecológica además de no representar daños significativos durante su manejo y operación.

En cuanto a costos la gasolina y el diésel son muy accesibles pero tóxicos.

Como conclusión el solvente más apropiado fue el D-limoneno debido a su bajo riesgo para la salud y el medio ambiente además de contar con la gasolina como solvente adicional debido a su bajo costo y accesibilidad teniendo en cuenta las precauciones y medidas de uso y operación (véase tabla 3).

Selección de los agregados y aditivos

Para la selección de agregados se buscaron alternativas que replacen los componentes típicos de un mortero de concreto (arena y grava) con el fin de proporcionar opciones igual de eficientes tomando en cuenta factores clave como la durabilidad, resistencia mecánica y su comportamiento estructural en el concreto.

Tabla 4. Comparativa de agregados

	Arena sílica	Grava sílica	Basalto	Garnet	Caliza triturada	Polvo de mármol
Densidad [g/cm ³]	2.65 - 2.70	2.65 - 2.75	2.8 - 3.1	3.5 - 4.3	2.6 - 2.7	2.6 - 2.7
Resistencia a la compresión [Mpa]	Media 30 - 50	Alta 50 - 70	Muy alta 100 - 150	Muy alta 80 - 120	Media 30 - 50	Media 20 - 40

Absorción de agua [%]	Baja <1%	Baja <1%	Muy baja <0.3%	Baja <0.5%	Alta 1-5%	Alta 5-8%
Dureza [Mohs]	7	7	6 - 7	7 - 7.5	3 - 4	3 - 4
Disponibilidad	Alta	Alta	Media	Media	Alta	Media
Costo	Bajo	Medio	Medio	Alto	Bajo	Medio
Impacto en la mezcla	Mejora la resistencia y reduce la retracción	Mejora durabilidad y resistencia mecánica	Alta resistencia, adecuado para estructuras pesadas	Aumenta la dureza y resistencia a la abrasión	Facilita el fraguado, pero puede reducir la resistencia	Mejora estética, pero puede reducir la resistencia

La mejor opción fue el garnet ya que cuenta con una buena resistencia mecánica y como complemento grava silica ya que es una opción balanceada con buena durabilidad (véase tabla 4).

Estos agregados representan buenas propiedades comparadas con la arena y la grava utilizados comúnmente en la fabricación de concretos.

El aprovechamiento de estos materiales se encuentra principalmente en la sostenibilidad y gestión de estos materiales, ambos suelen presentarse como subproductos, la sílica en procesos de elaboración de vidrio, corte de piedra y procesos de fundición, mientras que el garnet proviene de operaciones de sandblasting y cortes por chorro de agua, generando residuos son granulometrías aprovechables (Neville, 2011).

Para el tema de aditivos solamente se utilizaron pigmentos para dar coloración a los adoquines.

La incorporación de la mezcla disuelta entre polvo de poliestireno o perla contaminada y D-limoneno o gasolina representan un agregado extra ya que represento más del 5% del peso total del cemento.

Pruebas de densidad aparente

El objetivo de esta prueba fue tener una aproximación real de la densidad que podría tener el polvo de poliestireno y la perla contaminada ya que es importante comprender el comportamiento del material en la fabricación de los adoquines.

Se obtuvo la muestra del polvo de poliestireno y la perla contaminada, ambas se pesaron individualmente en una balanza analítica.

Los resultados se obtuvieron con una precisión de 0.0001g.

Se tomó una probeta de vidrio esterilizada de 10 ml, se taró la balanza con el peso de la probeta, con un embudo se llenó la probeta con la muestra hasta llegar a los 10 ml, se registró el peso que tuvo el polvo dentro de la probeta y se determinó la densidad aparente con la relación entre la masa y el volumen expresando un resultado en g/ml.

La toma de la densidad se realizó de la misma manera para los dos materiales y se hicieron 3 mediciones por cada una para sacar un promedio final de cada materia.



Ilustración 6. Muestra de polvo de poliestireno Ilustración 7. Determinación de la densidad aparente para el polvo de poliestireno



Ilustración 8. Muestra de perla contaminada

La determinación de la densidad aparente fue con base a la norma ISO 697-1. Rubber, raw – Determination of density – part 1.

Cálculo de proporciones para adoquines

Como propuesta inicial se fabricó un molde de madera de dimensiones 10 cm de largo, 5 cm de alto y 5 cm de ancho con el objetivo de encontrar la relación de disolución adecuada del polvo de poliestireno y la perla contaminada en el mortero de concreto.

Mackenzie, K. J., & Aldous, L (2000), en su artículo establecen la solubilidad de polímero en solventes no polares, dando una relación de 1:5 a 1:10 asegurando una disolución adecuada sin llegar a tener una mezcla demasiado diluida, siendo una relación polímero: solvente.

En el artículo llamado Propiedades Físico – Mecánicas de Morteros con Contenido de Poliestireno expandido (EPS) diluido como material aglomerante establece una relación proporcional entre la cantidad de poliestireno expandido frente al solvente suministrado, esta relación es 1 parte de poliestireno expandido contra 2 de solvente.

El artículo Polymer-modified cement – based materials de la revista Constructions and Building Materials proporciona una discusión sobre la proporción entre el polímero y solvente y como afecta en su integración en mezclas de cemento y como

una relación 1:1 permite una viscosidad controlada que permita ser mezclada con el cemento.

Se utilizó una primera relación de 1 parte de solvente por 3 de partes de polvo de poliestireno debido a que la consistencia que se buscaba debía tener una viscosidad similar a la de la miel, (2,000 a 10,000 mPa*s a temperaturas de 20 a 25°C).

Con la primera muestra de dilución realizada, se construyó una hoja de Excel para calcular las cantidades presentes de cada material, las proporciones fueron tomadas de la Tabla 3 del apartado Antecedentes.

Para la fabricación del primer adoquín se preparó el mortero tradicional de cemento con grava silica y garnet, se añadió la cantidad de agua poco a poco, por otra parte se realizó la disolución del polvo de poliestireno con el solvente para este primer contacto fue D-limoneno, esta disolución se realizó en un vaso de precipitado de 20 ml y se agitó con un agitador de vidrio a una velocidad constante hasta tener un fluido viscoso, se añadió la disolución al mortero y se mezcló hasta homogenizar todo, el mezclado se realizó de manera manual (véase ilustración 9).



Ilustración 9. Preparación del adoquín piloto

Elaboración de probetas para pruebas de compresión

De acuerdo con la Norma ASTM C39 para ensayos de compresión de probetas cilíndricas de hormigón, las probetas se fabricaron de acuerdo con la hoja de cálculo destinada a calcular las cantidades de material requerido con base a la geometría de la probeta necesaria.

Tabla 5. Dimensiones para probetas cilíndricas con base a la norma ASTM C39

Diámetro nominal (d)	Altura nominal (h)	Agregado máximo permitido
150 mm (6 in)	300 mm (12 in)	Hasta 50 mm (2 in)
100 mm (4 in)	200 mm (8 in)	Hasta 25 mm (1 in)

La relación entre la altura de la probeta y su diámetro debe ser de 2:1, el concreto deberá ser colocado en capas de igual espesor compactando cada capa para evitar la presencia de vacíos (véase tabla 5).

Las condiciones para el curado fueron con base a la norma ASTM C31 que indica mantener la probeta en el molde de 24 a 48 horas a temperatura ambiente y con humedad relativa superior al 95%, posteriormente desmoldar y almacenar en agua saturada con cal, el tiempo de curado antes de la prueba debe ser de 7, 14 o 28 días.

Se prepararon 6 probetas, 3 con matriz de polvo de estireno con D-limoneno y 3 con matriz de perla contaminada con gasolina.

Las etapas de proceso se dividieron en 2 vertientes.

Primera etapa: preparación del mortero tradicional de concreto.

Materiales

- Cemento portland tipo I, de acuerdo con ASTM C150
- Garnet (agregado fino)
- Grava silica (agregado grueso)
- Agua potable, de acuerdo con ASTM C1602
- Disolución de (polvo de poliestireno o perla contaminada) con solvente (D-limoneno o gasolina)
- Moldes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto

Los moldes se construyeron a partir de latas de aluminio de dimensiones conocidas (150 mm de diámetro por 150 mm de alto), se juntaron 2 latas para alcanzar la altura

requerida por norma, se reforzaron las uniones con silicón caliente y cinta americana para evitar la presencia de fugas de material (véase ilustración 10-11).



Ilustración 10. Moldes para prueba de compresión ASTM C39



Ilustración 11. Fabricación de moldes

La preparación del mortero comenzó con la adición del cemento formado un montículo donde en el centro se añadió una pequeña cantidad de agua, se comenzó a mezclar de manera manual con una pala, se añadieron gradualmente los agregados finos y gruesos, lentamente se añadió el restante del agua mientras se mantenía el mezclado hasta obtener una consistencia homogénea sin grumos ni material seco.



Ilustración 12. Preparación del mortero

Segunda etapa: disolución polímero – solvente

Se midió la proporción calculada para el polvo de poliestireno o la perla contaminada, así como la cantidad del solvente adecuado, para el caso del D-limoneno se hicieron pruebas de densidad aparente para la determinación de su densidad.

Tabla 6. Identificación polímero con solvente

Polímero	Solvente
Polvo de poliestireno	D-limoneno
Perla contaminada	Gasolina

Se obtuvo la muestra de D-limoneno, se tomó una probeta de vidrio esterilizada de 10 ml, se taró la balanza con el peso de la probeta, con un embudo se llenó la probeta con la muestra hasta llegar a los 10 ml, se registró el peso que tuvo el D-limoneno dentro de la probeta y se determinó la densidad aparente con la relación entre el peso y el volumen expresando un resultado en g/ml.

Se hicieron 3 mediciones por cada una para sacar un promedio final de cada materia.



Ilustración 13. Determinación de la densidad aparente del D-limoneno

La disolución se llevó a cabo de manera manual durante 15 minutos dentro de una cubeta de plástico para asegurar que el polvo de poliestireno o la perla contaminada se disolvieran por completo y no quedara tan diluido y conservara una buena viscosidad.

Con el agregado reciclado listo y el mortero homogéneo e hidratado se integraron ambas mezclas, se mezcló manualmente con la pala hasta conseguir una completa fusión de las mezclas, para su posterior almacenamiento en los moldes (véase ilustración 14).



Ilustración 14. Vaciado de la mezcla en los moldes

Se peso cada molde de aluminio para descartar el valor de la masa de la probeta final.



Ilustración 15. Pesaje del molde

Todas las probetas se dejaron curar por 28 días a temperatura ambiente (véase ilustración 16).



Ilustración 16. Probetas para pruebas de compresión ASTM C39

Pruebas de compresión

La prueba de compresión se realizó con el objetivo de determinar la resistencia mecánica del concreto propuesto para la fabricación de adoquines, la norma ASTM C39 establece el procedimiento para la realización de la prueba en especímenes cilíndricos, para ello se utilizó el equipo CMSUTM-600B Computer Control Electro-Hydraulic Servo Universal Testing Machine (véase ilustración 17).



Ilustración 17. Computer Control Electro-Hydraulic Servo Universal Testing Machine

La capacidad del equipo debe ser suficiente para soportar la resistencia máxima esperada para el concreto, la mezcla propuesta busca soportar una carga de 250 Kg/cm² o su equivalente 24.5 MPa.

La CMSUTM-600B tiene una capacidad de 600 kN, lo que es suficiente para la mayoría de los concretos, el equipo debe ser capaz de aplicar una carga constante

de 1.0 ± 0.2 MPa/s para concretos estructurales, este equipo cuenta con un sistema servo-controlado que permite ajustar la tasa de carga con precisión.

Después de los 28 días de curado de las probetas se desmoldaron, se identificaron, se pulieron y se rebajaron para que las superficies y la cara lateral de cada probeta estuviera lisa y nivelada (véase ilustración 18-19).



Ilustración 18. Desmolde y preparación de probetas



Ilustración 19. Desbaste y pulido de probetas de concreto

La norma ASTM C39 establece que las probetas deben estar en un estado de humedad controlada donde la superficie debe estar seca, pero con saturación interna antes de probar por lo que una probeta de polvo de poliestireno y una de perla contaminada fueron sumergidas en agua durante 15 minutos para garantizar las condiciones previas del ensayo y minimizar los efectos de la deshidratación del

concreto y asegurar condiciones de humedad uniformes durante la prueba (véase tabla 7).

Tabla 7. Curado adicional por probeta

No. Probeta	Polímero	Solvente	Curado adicional
1	Polvo de poliestireno	D-limoneno	Si (15 minutos)
2	Polvo de poliestireno	D-limoneno	No
3	Polvo de poliestireno	D-limoneno	No
1	Perla contaminada	Gasolina	Si (15 minutos)
2	Perla contaminada	Gasolina	No
3	Perla contaminada	Gasolina	No

Después de sumergir en agua se dejaron secar 30 minutos antes del ensayo, se secaron los excedentes de agua superficial con un trapo sin secar por completo la probeta, una mala humedad dentro del cilindro puede modificar significativamente la resistencia del concreto y afectar la veracidad de los resultados (véase ilustración 20).



Ilustración 20. Aseguramiento de condiciones de humedad controlada

Con las 6 probetas listas se colocaron en el centro de la maquina universal de ensayo para compresion y se alineo correctamente el eje de la muestra con el eje de la carga aplicada, una carga axial continua fue suministrada sin impactos ni

interrupciones, la carga se aplicó hasta que cada probeta llegara al fallo y se manifestara una ruptura visible en el material.

Se registraron los valores de carga máxima soportada por cilindro en kilonewtons (kN) (véase ilustración 21).



Ilustración 21. Pruebas de compresión ASTM C39

Elaboración de adoquines para prueba en cámara PV1200

La cámara de pruebas PV1200 Environment Cyclic Test es un equipo diseñado para simular variaciones de temperaturas extremas en materiales y así poder evaluar su resistencia ante ciclos térmicos que van desde -40°C hasta los 80°C .

Estas pruebas son perfectas para estudiar la durabilidad y estabilidad de los materiales expuestos a cambios térmicos en condiciones reales.

Los adoquines están expuestos a cambios de temperatura durante el día y la noche, ciclos de congelación y descongelación en climas fríos y la exposición al calor en climas cálidos todo esto dependiendo de la ubicación geográfica donde el adoquín se encuentre.

Normas como la ASTM C1262 somete al adoquín a ciclos de temperatura desde los 0°C hasta los 10°C , la norma ASTM C67 mide la expansión y contracción del adoquín cuando se somete a temperaturas extremas como por ejemplo el rango utilizado por la cámara PV1200 (-40°C hasta los 80°C).

El método utilizado descrito por el fabricante ascott y menciona lo siguiente:

Un ciclo dura 12 horas (720 minutos) y consta de 5 pasos:

- Paso 1 – 1 hora (60 minutos) fase de calentamiento de +80°C con un 80% de humedad relativa.
- Paso 2 – 4 horas (240 minutos) tiempo de espera a +80°C y 80% de humedad relativa.
- Paso 3 – 2 horas (120 minutos) fase de enfriamiento de -40°C, cuando el punto de congelamiento es alcanzado: aproximadamente 30% de humedad relativa, la humedad del aire se mantiene sin regular a partir de $T < 0^{\circ}\text{C}$ (dependiendo del sistema, la regulación de la humedad también puede ser suspendida a partir de $T < 10^{\circ}\text{C}$).
- Paso 4 – 4 horas (240 minutos) tiempo de espera a -40°C, la humedad en el aire se mantiene incontrolable.
- Paso 5 – 1 hora (60 minutos) fase de calentamiento a +23°C, la humedad relativa es regulada a 30% a partir de $T = 0^{\circ}\text{C}$.

Las tolerancias alrededor de los valores de ajuste son los siguientes:

- Temperatura de tolerancia $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- Humedad relativa $\pm 5\%$

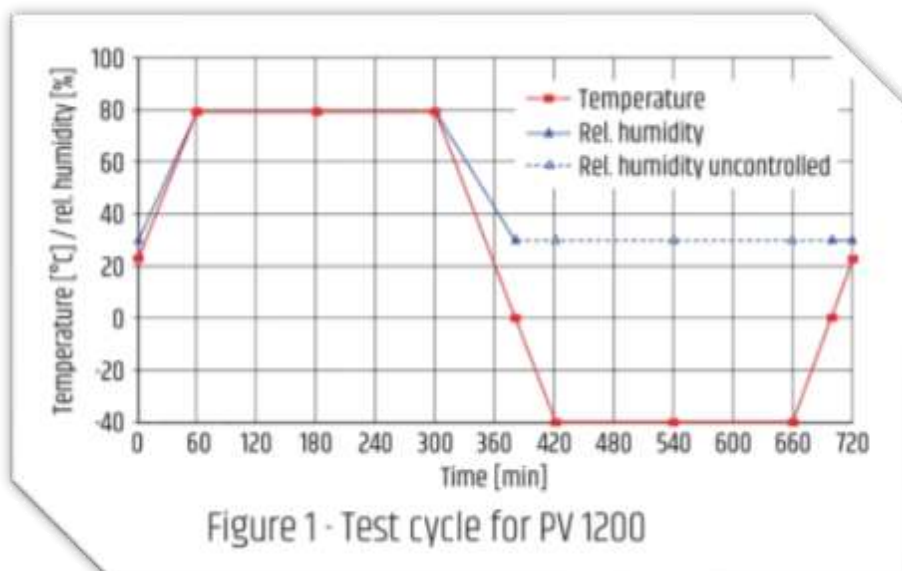


Ilustración 22. Test cycle for PV 1200

Para el ensayo de cambio de condiciones climáticas se usó el equipo CTS, cámara de pruebas climáticas de la serie C (véase ilustración 23).



Ilustración 23. Cámara de pruebas climáticas de la serie C (CTS)

Se prepararon adoquines como probetas para el ensayo dentro de la cámara de pruebas climáticas (véase ilustración 24).

Materiales

- Cemento portland tipo I, de acuerdo con ASTM C150
- Garnet (agregado fino)
- Grava silica (agregado grueso)
- Agua potable, de acuerdo con ASTM C1602
- Disolución de polvo de poliestireno con solvente (gasolina)
- Moldes hexagonales para adoquines de 4.5 cm de alto por 5.5 cm de lado

Los cálculos para la determinación de proporciones en volumen para los agregados finos, gruesos y aditivos fueron tomadas del Excel previamente construido.



Ilustración 24. Materiales para la fabricación de adoquines

Se formo un montículo con el cemento Portland haciendo un cráter en el centro, se añadió una pequeña cantidad de agua para empezar el mezclado de manera manual, se añadieron los materiales secos restantes (garnet y grava silica) mientras eran mezclados con una espátula, lentamente se agregó más agua mientras se mantenía el mezclado haciendo movimientos desde el borde del mortero hacia el centro, se mezcló hasta obtener una consistencia uniforme y libre de grumos o material seco.

Se midió una proporción de polvo de poliestireno adecuada de acuerdo con la cantidad de gasolina requerida en la hoja de cálculo, la mezcla se llevó a cabo mediante un mezclado manual durante 15 minutos a una velocidad constante dentro de un vaso de plástico hasta alcanzar la consistencia necesaria.

A la mezcla se le adiciono un aditivo en forma de colorante para concreto, la disolución del polvo de poliestireno y el colorante se adicionaron al mortero y se mezcló hasta lograr una apariencia homogénea en color (véase ilustración 25).



Ilustración 25. Preparación del mortero, la disolución del polvo de poliestireno en gasolina y la incorporación del agregado extra y el aditivo

Se preparo mezcla suficiente para fabricar 3 adoquines a disponer para los ensayos de cambios climáticos, los adoquines se dejaron curar por 28 días antes del ensayo (véase ilustración 26).

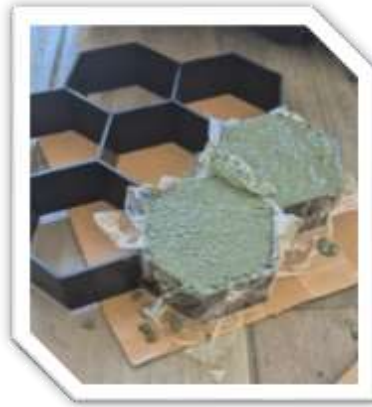


Ilustración 26. Moldeo de los adoquines

Ensayo de resistencia a la absorción (ASTM C140)

Esta prueba en adoquines de concreto nos permite evaluar la capacidad que tienen de absorber agua y determinar su porosidad y durabilidad ante condiciones de humedad o congelación.

Material y equipo

- Horno de secado (con capacidad de alcanzar temperaturas de 100°C a
- Balanza de precisión
- Recipientes de inmersión con capacidad suficiente para sumergir la muestra
- Toallas absorbentes
- Cronometro o temporizador
- Pinzas o guantes térmicos
- Termómetro para controlar la temperatura del agua

Se tomo uno de los adoquines preparados para el ensayo de cambios climáticos para este ensayo, del cual se tomó su peso inicial antes de ser sometido al horno (véase ilustración 27).



Ilustración 27. Adoquín para prueba de absorción de agua

Se colocó el adoquín en un horno para laboratorio marca Memmert (véase ilustración 28) con un rango de temperatura de 100°C a 115°C y con flujo de aire que garantice una evaporación uniforme durante 24 horas de acuerdo con el siguiente criterio:

- Adoquines pequeños (≤ 100 mm de espesor) – tiempo de secado 24 horas mínimo
- Adoquines más gruesos (> 100 mm de espesor) – tiempo de secado de 48 horas mínimo

Después del tiempo transcurrido se sacó el adoquín y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente después de eso se pesó y se anotó el valor obtenido, se continuó secando en intervalos de 2 horas tomando el peso hasta obtener dos pesajes consecutivos con una diferencia de $\leq 0.2\%$, registrando los datos en una tabla.



Ilustración 28. Horno para laboratorio Memmert

Cuando el peso es contante se hizo la inmersión del adoquín en un recipiente con agua a temperatura ambiente dejando el adoquín completamente sumergido durante 24 ± 0.5 horas (véase ilustración 29).

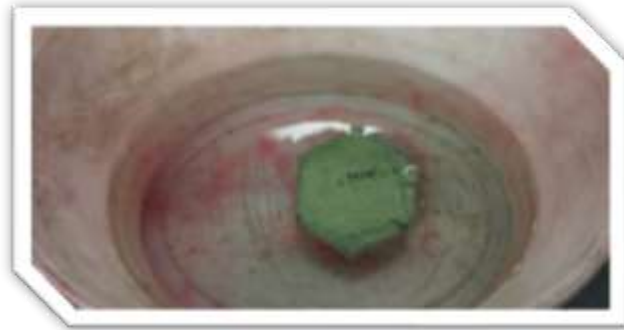


Ilustración 29. Prueba de absorción de agua

Se sacó el adoquín y se secó con las toallas absorbentes hasta eliminar todas las gotas de agua visibles en la superficie, se tomó el peso del adoquín en estado de saturación superficial seca.

Con el valor del peso del adoquín después del proceso de secado y después de la inmersión se calculó la absorción (véase ilustración 30).



Ilustración 30. Secado final para cálculo de absorción de agua

Pruebas complementarias

Se sometió a unos de los adoquines fabricados a pruebas complementarias después de la cámara PV1200, se evaluó la capacidad del adoquín para resistir impactos dinámicos concentrados simulando el efecto de caída de objetos pesados, con ayuda de inteligencia artificial se adaptó la prueba de la norma ASTM D4272

para plásticos reforzados y la EN ISO 13036-5: para superficies de pavimento ya que no existe una normativa específica de caída de bola para adoquines, la adaptación de estas normas se justificó considerando la necesidad de mantener procedimientos conocidos para la reproducibilidad del ensayo sobre superficies de concreto no normadas (véase ilustración 31).

Para el ensayo se utilizó una bola de acero templado de masa conocida de 883.56 gramos, un soporte vertical con guía de caída, cinta métrica, lupa o microscopio portátil y un vernier, se tomaron registros visuales y dimensionales ante cualquier presencia de daño generado por grietas o fisuras, esta prueba se realizó en 3 diferentes puntos sobre la superficie de trabajo.

Se tomo como base de análisis un límite de profundidad de daño o parea afectada no mayor a 3 mm de profundidad o 5 cm² de área astillada.

Antes de iniciar el ensayo el adoquín se dejó secar en un horno durante 24 horas a una temperatura de 105°C para eliminar la humedad residual en la superficie del adoquín.

Para el inicio del ensayo se colocó el adoquín sobre la superficie rígida y nivelada del equipo de caída de bola, se ubicó la esfera de acero a una altura de 0.7 m sobre el centro del adoquín y se soltó la esfera sin fuerza adicional.

Se tomaron registro de las posibles afectaciones físicas al material y se repitió 5 veces más.



Ilustración 31. Equipo para ensayo de caída de bola

Se realizó un ensayo de abrasión superficial (desgaste por fricción con lija), (véase ilustración 32) con el objetivo de evaluar su resistencia frente al tránsito, fricción seca o erosión mecánica.

La norma de referencia para la estandarización del ensayo fue basada en la ASTM C944 (Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method), ASTM C779/C779M (Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces) y la UNE-EN 1338 (anexo D) que determina la pérdida de masa en adoquines de concreto.

Se ocupó una lija carburo de silicio, grano 80, dispositivo de fricción circular con velocidad de 300 rpm, un cronometro, una balanza analítica y un vernier.

Antes de iniciar el ensayo el adoquín se dejó secar en un horno durante 24 horas a una temperatura de 105°C para obtener una masa constante con diferencia <0.2% en dos pesajes consecutivos, se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 1 hora y se obtuvo el peso inicial del adoquín, se montó la lija en la desbastadora y se puso el adoquín encima, se mantuvo una fuerza constante sobre el material haciéndolo girar durante 500 ciclos a 300 rpm, equivalente a 100 segundos de acuerdo a una fórmula que relaciona el número de ciclos entre las repeticiones por minuto para determinar su equivalencia en tiempo, sobre una base rotatoria, se limpió el polvo generado y se obtuvo el peso para obtener la masa final para calcular la pérdida de masa resultante después del desgaste y se repitió el ensayo 2 veces más.



Ilustración 32. Ensayo de abrasión por fricción seca

Después de las pruebas se cortó el adoquín obteniendo 2 partes representativas para los últimos 2 ensayos complementarios.

Se evaluó la calidad de la adherencia entre la disolución del polvo de poliestireno o la perla contaminada y la matriz cementante mediante una inspección en un microscopio óptico a un aumento de x5, 20x y 50x, la metodología fue adaptada por inteligencia artificial partiendo de análisis de microestructura en materiales metálicos y polímeros debido a la falta de normativa formal (véase ilustración 33).

El trozo de interés del adoquín se cortó transversalmente con un cincel y martillo dejando una zona lo más lisa posible, se pulió suavemente con una lija de carburo de silicio, grano 80, 240, 500 y 1200 lubricando con agua de manera contante, se puso baso análisis del microscopio óptico en busca de vacíos o burbujas de aire, homogeneidad de la distribución y la integración o des adherencia del material.

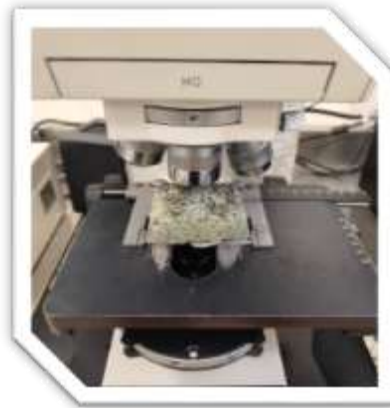


Ilustración 33. Evaluación de la matriz polímero/solvente-cemento

Se realizó un ensayo adaptado de la norma ASTM C267-20 (Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars) con el objetivo de estimar la resistencia del adoquín a ambientes con agentes químicos que pueden ser corrosivos o incluso agresivos. La parte representativa para esta muestra se subdividió en 3 partes de pesos conocidos en seco antes de la inmersión, cada parte fue sometida a las siguientes soluciones:

Ácido clorhídrico (HCL) al 5% (ácido fuerte) sumergido durante 7 días.

Hidróxido de sodio (NaOH) al 5% (base fuerte) sumergido durante 7 días.

Cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% (solución salina) sumergido durante 7 días.

Cada solución fue preparada en un volumen total de 250 ml con agua desionizada.

Se llevo un control diario de posibles cambios visibles (color, textura, formación de burbujas o grietas), después de los 7 días se retiraron las muestras, se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas y se tomó el peso final (véase ilustración 34).

Este ensayo permite simular 2 variaciones de agresión química, ácidos fuertes simulando corrosión por contaminación ácida de ambientes industriales, bases fuertes simulando presencia de residuos industriales o de limpieza y una solución salina que simule corrosión por cloruros o ambientes marinos.

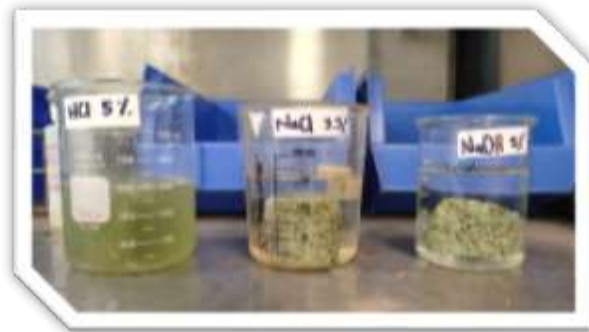


Ilustración 34. Ensayo de resistencia química en adoquines a base de residuos de poliestireno expandido

Preparación de adoquines finales

Se fabrica un adoquín final recopilando toda la información obtenida por parte de las pruebas realizadas, la ASTM C39, la ASTM C140 y la prueba en cámara de cambios climáticos siguiendo la misma metodología descrita en este documento, ajustando las cantidades necesarias en la hoja de cálculo de Excel, utilizando una geometría hexagonal de 8 cm por lado y 5 cm de altura.



Ilustración 35. Agregados finales para adoquines de jardinería

Evaluación del impacto económico de adoquines con polvo de EPS

El costo sobre la producción de adoquines varía dependiendo del método por el cual estén fabricados, pueden ser por moldeo en seco donde se utilizan maquinas vibro compactadoras, molde en húmedo con acabados más detallados o con formas personalizadas, prensado en húmedo para adoquines de cerámica o arcilla y métodos de extrusión para adoquines de plástico reciclado, cada método varía dependiendo del tipo de maquinaria usada.

Se evaluó el impacto económico de los adoquines tomando los siguientes puntos:

- Datos de producción de adoquines con polvo de poliestireno o perla contaminada como agregado reciclado
 - Cantidad de solvente requerido para disolver el agregado reciclado
 - Costo de material principal (cemento, garnet y grava silica)
 - Costos indirectos (energía, mano de obra, equipo y transporte)
- Datos de producción de adoquines tradicionales
 - Composición de materiales
 - Costos asociados (energía, mano de obra y transporte)

Capítulo III: Resultados y discusiones

Pruebas de densidad aparente

Se realizó la determinación de la densidad aparente bajo la ISO 697-1: Rubber, raw – determination of density – part 1, que establece el procedimiento para medir la densidad de materiales poliméricos.

Tabla 8. Datos experimentales del polvo de poliestireno para la determinación de su densidad aparente

Parámetro	Valor	Unidad
Masa del polvo de poliestireno (m)	a) 5.4650 b) 5.4652 c) 5.4649	g
Volumen de la probeta de medición (V)	10	ml
Densidad aparente calculada (ρ)	a) 0.54650 b) 0.54652 c) 0.54649	g/ ml
Densidad promedio	0.5465	g/ ml

Tabla 9. Datos experimentales de la perla contaminada de poliestireno para la determinación de su densidad aparente

Parámetro	Valor	Unidad
Masa del polvo de poliestireno (m)	a) 6.2465 b) 6.2462 c) 6.2460	g
Volumen de la probeta de medición (V)	10	ml
Densidad aparente calculada (ρ)	a) 0.62465 b) 0.62462 c) 0.62460	g/ ml
Densidad promedio	0.6246	g/ ml

La densidad aparente se calculó utilizando la ecuación:

$$\text{densidad } (\rho) = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Ecuación 2. Densidad aparente

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 (véase tablas 8 y 9).

Para estudios posteriores, se recomienda analizar o limpiar la perla contaminada y evaluar la influencia de la granulometría en la densidad.

Cálculo de proporciones para adoquines

La viscosidad de la mezcla se determinó de manera visual comparada con la viscosidad de la miel comparadas en tiempo real hasta alcanzar una similitud entre ambos fluidos.

Los datos para los cálculos de Excel se estructuraron de acuerdo con los datos de entrada como volúmenes y pesos, cálculo de proporciones en función de las relaciones de disolución y ajuste de la cantidad del solvente requerido y los resultados de las cantidades de cada material en unidades de volumen de mortero (véase tabla 10).

Tabla 10. Determinación de la geometría del adoquín

Propuesta para los adoquines		
Geometría	4	Rectángulo
Área de la figura	50	cm ²
Altura	5	cm
Lado	10	cm
Perímetro	30	cm
Ancho	5	cm
Volumen	250	cm ³

Se tomaron las siguientes proporciones de materiales para la fabricación del mortero, en caso de añadir un aditivo extra la relación del agua se ajusta en relación con el aditivo como un colorante que sea en polvo que va del 2-5% en peso del cemento (véase tabla 11).

Tabla 11. Proporciones estándar para la fabricación del mortero

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

Para conocer el peso estimado del adoquín se calculó la densidad de toda la mezcla calculando primero el volumen de cada material multiplicando su relación dentro de la mezcla por 1000 y luego dividiendo entre su densidad, la masa total se calculó con la suma de las proporciones de los materiales de la Tabla 12.

El volumen total se calculó a partir de la suma de los volúmenes resultantes de cada material.

Tabla 12. Calculo 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	3182.1858	2.1081
2.4	Garnet	833.3333	6750		
2.5	Grava silica 1/8	1200			
1	Agua	600			

0.648	Mezcla polímero/solvente	231.3922			
0.5465	Polímero	15	25	38	0.648
0.75	Gasolina	5			

La densidad de la mezcla polímero/solvente se determinó con la ayuda de la siguiente tabla:

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

Mezcla polímero/solvente		Relación 1:3
Densidad del polímero	0.5465	g/ml
Densidad solvente (gasolina)	0.75	g/cm ³
Cantidad solvente	5	ml
Peso Gasolina	3.75	gr
Cantidad de polímero	15	ml
peso del polímero	8.1975	gr
Peso total	11.9475	gr

En esta tabla la cantidad de gasolina se puso como referencia para tener un aproximado de las cantidades para el volumen del polímero y el solvente, más adelante este valor es ajustado con los parámetros necesarios.

Tabla 14. Peso estimado por unidad de adoquín

Densidad de la mezcla	2.1081	g/cm ³
Peso estimado	527.0321	gr
	0.5270	Kg

Con el valor de la densidad de la mezcla se puede determinar el peso estimado por pieza de cada adoquín multiplicando el volumen de la geometría por la densidad de la muestra calculada (véase tabla 14).

Como cálculos finales con el peso estimado total de cada pieza, se calcula la cantidad necesaria de cada material para la fabricación de un solo adoquín (véase tabla 15).

Tabla 15. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	0.5270	kg	527.0	gr
Cemento	0.0781	kg	78.1	gr
Garnet	0.1562	kg	156.2	gr
Grava silica 1/8	0.2342	kg	234.2	gr
Mezcla polímero/solvente	0.0117	kg	11.7	gr
Colorante	-	kg	-	gr
Agua	0.0468	L	46.8	ml

Con la hoja de trabajo terminada solamente se ajustan los valores de la geometría de cada adoquín por hacer, ya sean hexagonales o piezas cilíndricas para la elaboración de probetas.

Pruebas de compresión

Las cantidades requeridas de material para las probetas de concreto endurecidas de acuerdo con el tamaño especificado por la ASTM C39 se obtuvieron de una hoja de cálculo de Excel (véase tabla 16).

Tabla 16. Determinación de la geometría del adoquín

Probeta de concreto 30x15 cm		
Geometría		Cilíndrica
Área de la base	182.4127	cm ²
Diámetro de la base	15.24	cm
Radio	7.62	cm
Altura del cilindro	30.48	cm
Volumen	5559.9998	cm ³

Se tomaron las siguientes proporciones de materiales para la fabricación del mortero.

Tabla 17. Proporciones estándar para la fabricación del mortero

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

Se calculó la densidad de toda la mezcla y el volumen total a partir de la suma de los volúmenes resultantes de cada material.

Las primeras 3 probetas se realizaron de una mezcla de polvo de poliestireno disuelto con D-limoneno, por lo tanto, se determinó su densidad aparente (véase tabla 18).

Tabla 18. Datos experimentales de la perla contaminada de poliestireno para la determinación de su densidad aparente

Parámetro	Valor	Unidad
Masa del D-limoneno (m)	d) 7.6719 e) 7.6710 f) 7.6723	g
Volumen de la probeta de medición (V)	10	ml
Densidad aparente calculada (ρ)	d) 0.7671 e) 0.7671 f) 0.7672	g/ ml
Densidad promedio	0.7671	g/ ml

La densidad aparente se calculó utilizando la ecuación:

$$\text{densidad } (\rho) = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Ecuación 3. Densidad aparente

El valor de la densidad aparente para el D-limoneno fue 0.7671 g/ml.

Tabla 19. Calculo 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 silica 1/8	1200			
1	Agua	600			
0.648	Mezcla polímero/solvente	234.9562			
0.5465	Polímero	239.4	262	410.4	0.638
0.7671	D-limoneno	171			

La densidad de la mezcla polímero/solvente se determinó con la ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 20. 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 (D-limoneno)	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

En esta tabla la cantidad de D-limoneno se puso como referencia para tener un aproximado de las cantidades para el volumen del polímero y el solvente, más adelante este valor es ajustado con los parámetros necesarios.

Tabla 21. Peso estimado por unidad de adoquín

Densidad de la mezcla	2.1188	g/cm ³
Peso estimado	11780.5853	gr
	11.7806	Kg

Con el valor de la densidad de la mezcla se puede determinar el peso estimado por pieza de cada adoquín multiplicando el volumen de la geometría por la densidad de la muestra calculada.

Como cálculos finales con el peso estimado total de cada pieza, se calcula la cantidad necesaria de cada material para la fabricación de un solo adoquín (véase tabla 22).

Tabla 22. 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 silica 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

Se realizaron otras 3 probetas de concreto, pero ahora con la mezcla gasolina disuelta con perla contaminada de poliestireno, los cálculos siguieron la misma metodología que las primeras 3 probetas (véase tabla 23 a 25).

Tabla 23. Determinación de la geometría del adoquín

Probeta de concreto 30x15 cm		
Geometría		Cilíndrica
Área de la base	182.4127	cm ²
Diámetro de la base	15.24	cm
Radio	7.62	cm
Altura del cilindro	30.48	cm
Volumen	5559.9998	cm ³

Tabla 24. Proporciones estándar para la fabricación del mortero

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

Tabla 25. Calculo 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	2.1211
2.4	Garnet	833.3333	6750		
2.5	Grava silica 1/8	1200			
1	Agua	600			
0.648	Mezcla polímero/solvente	231.3922			
0.5465	Polímero	204	264	408	0.648
0.75	Gasolina	204			

La densidad de la mezcla polímero/solvente se determinó con la ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 26. 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 (D-limoneno)	0.75	g/cm ³
Cantidad solvente	204	ml
Peso Gasolina	153	gr
Cantidad de polímero	204	ml
peso del polímero	111.486	gr
Peso total	264	gr

En esta tabla la cantidad de gasolina se puso como referencia para tener un aproximado de las cantidades para el volumen del polímero y el solvente, más adelante este valor es ajustado con los parámetros necesarios.

Tabla 27. Peso estimado por unidad de adoquín

Densidad de la mezcla	2.1211	g/cm ³
Peso estimado	11793.7796	gr
	11.78938	Kg

Con el valor de la densidad de la mezcla se puede determinar el peso estimado por pieza de cada adoquín multiplicando el volumen de la geometría por la densidad de la muestra calculada.

Como cálculos finales con el peso estimado total de cada pieza, se calcula la cantidad necesaria de cada material para la fabricación de un solo adoquín (véase tabla 28).

Tabla 28. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	11.7938	kg	11793.8	gr
Cemento	1.7472	kg	1747.2	gr
Garnet	3.4945	kg	3494.5	gr
Grava silica 1/8	5.2417	kg	5241.7	gr
Mezcla polímero/solvente	0.2621	kg	262.1	gr
Colorante	-	kg	-	gr
Agua	1.0483	L	1048.3	ml



Ilustración 36. Identificación de probetas para prueba ASTM C39

Las probetas fueron colocadas en la maquina universal para ensayos de compresión y se les aplico una carga axial creciente a velocidad constante de acuerdo con lo descrito por la norma ASTM C39, se anotaron los valores de carga y desplazamiento de cada probeta hasta el punto de falla de cada una (véase ilustración 37).



Ilustración 37. Pruebas de compresión ASTM C39

Los valores de carga máxima aplicada y el desplazamiento obtenido se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 29. 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

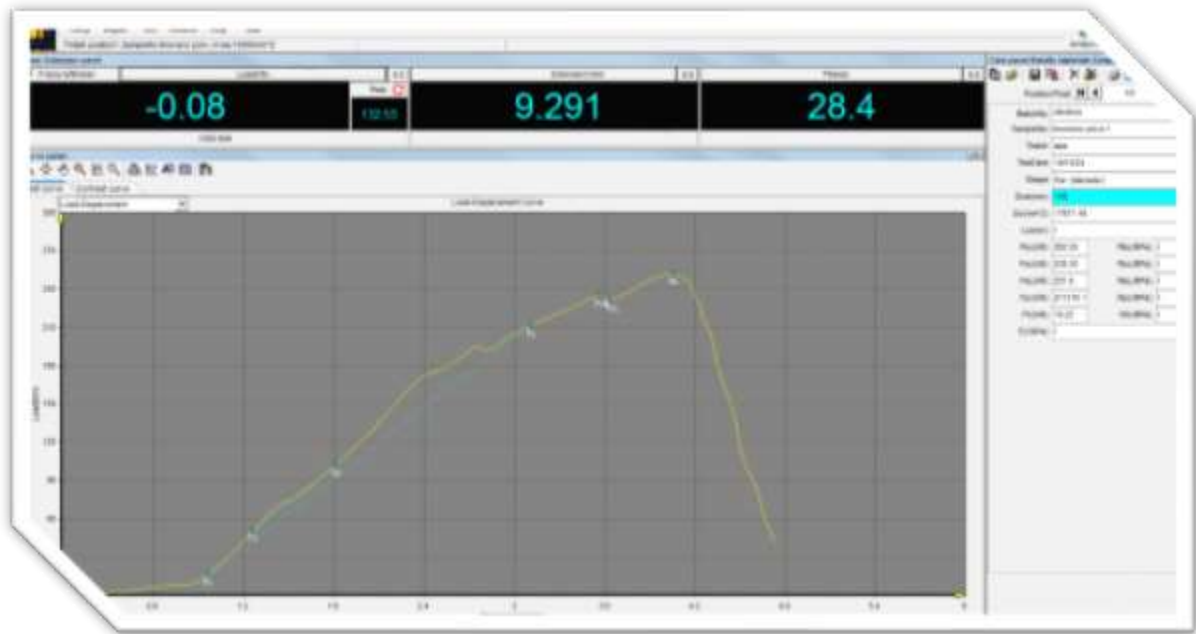


Ilustración 38. Grafica carga-desplazamiento obtenida del equipo CMSUTM-600B.

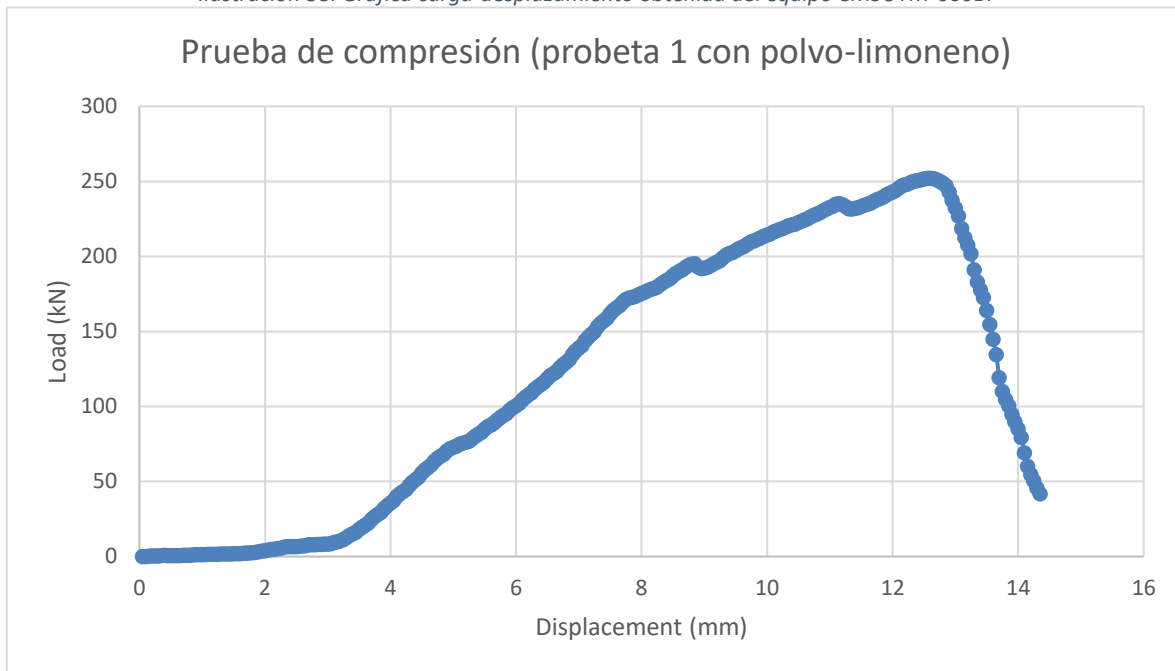


Ilustración 39. Grafica carga-desplazamiento construida en Excel para la probeta (1)

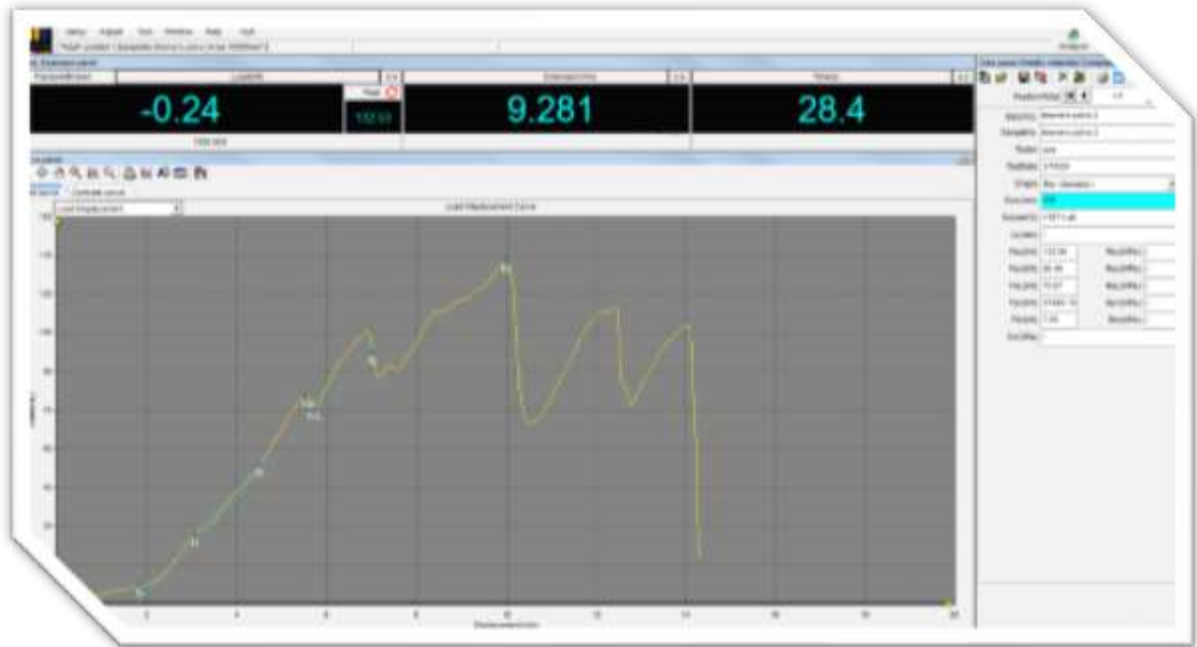


Ilustración 40. Grafica carga-desplazamiento obtenida del equipo CMSUTM-600B.

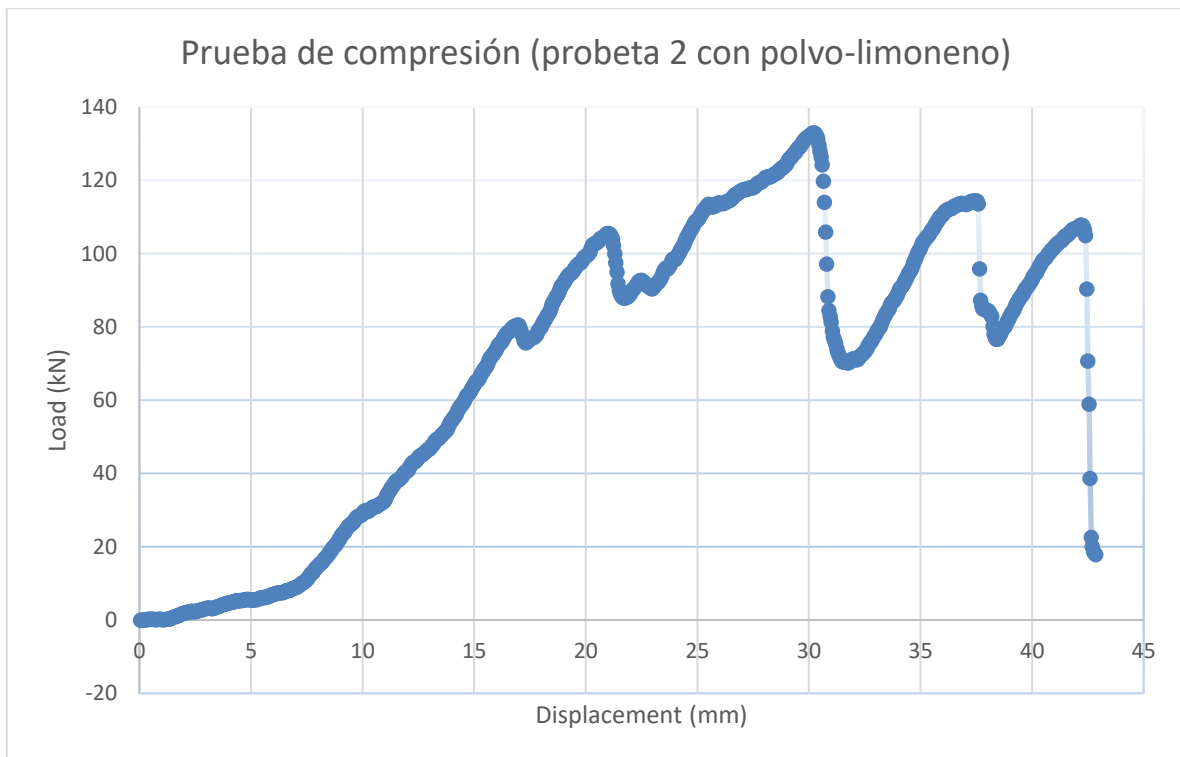


Ilustración 41. Grafica carga-desplazamiento construida en Excel para la probeta (2)

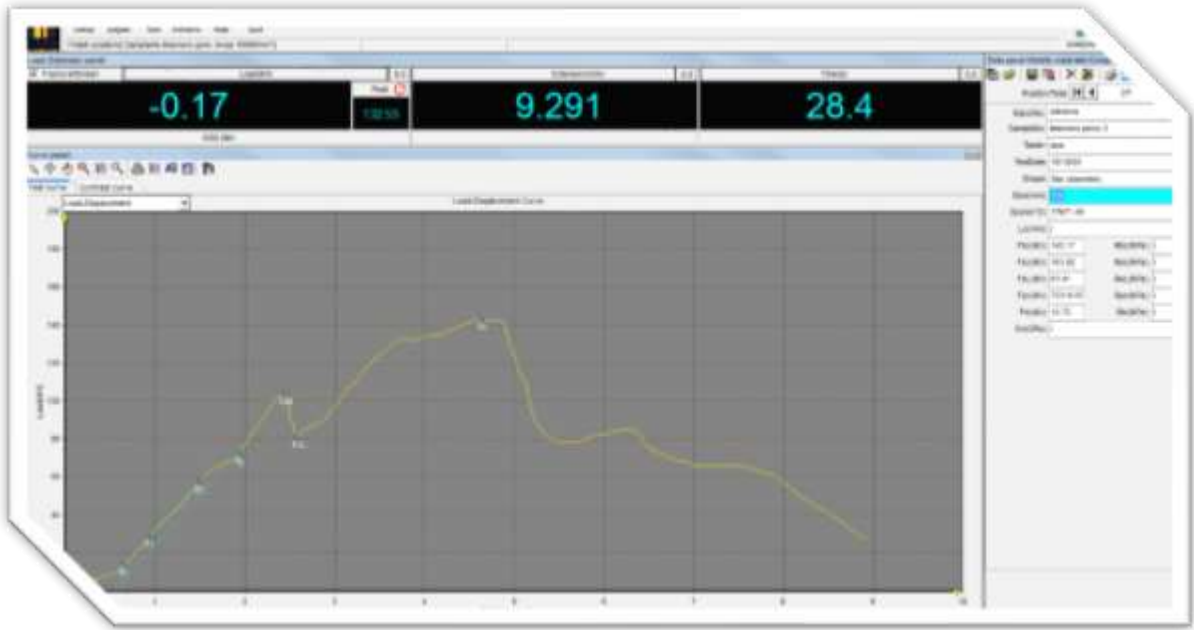


Ilustración 42. Grafica carga-desplazamiento obtenida del equipo CMSUTM-600B.

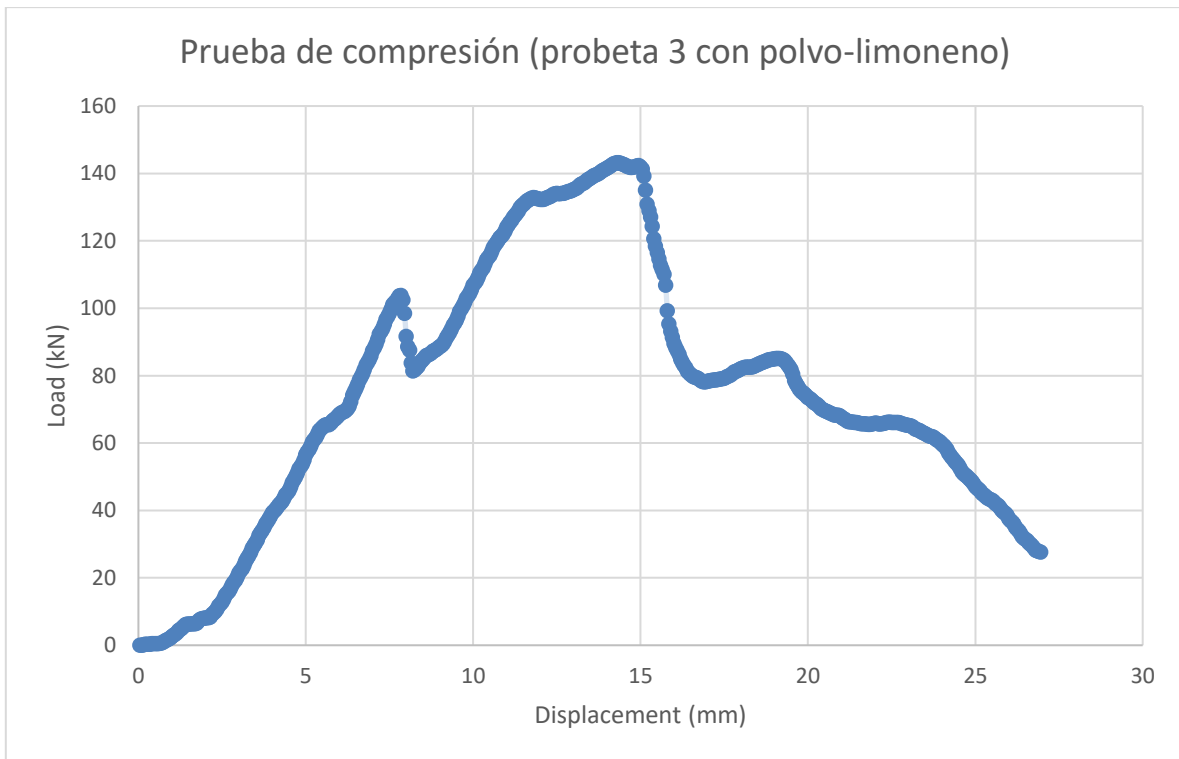


Ilustración 43. Grafica carga-desplazamiento construida en Excel para la probeta (3)

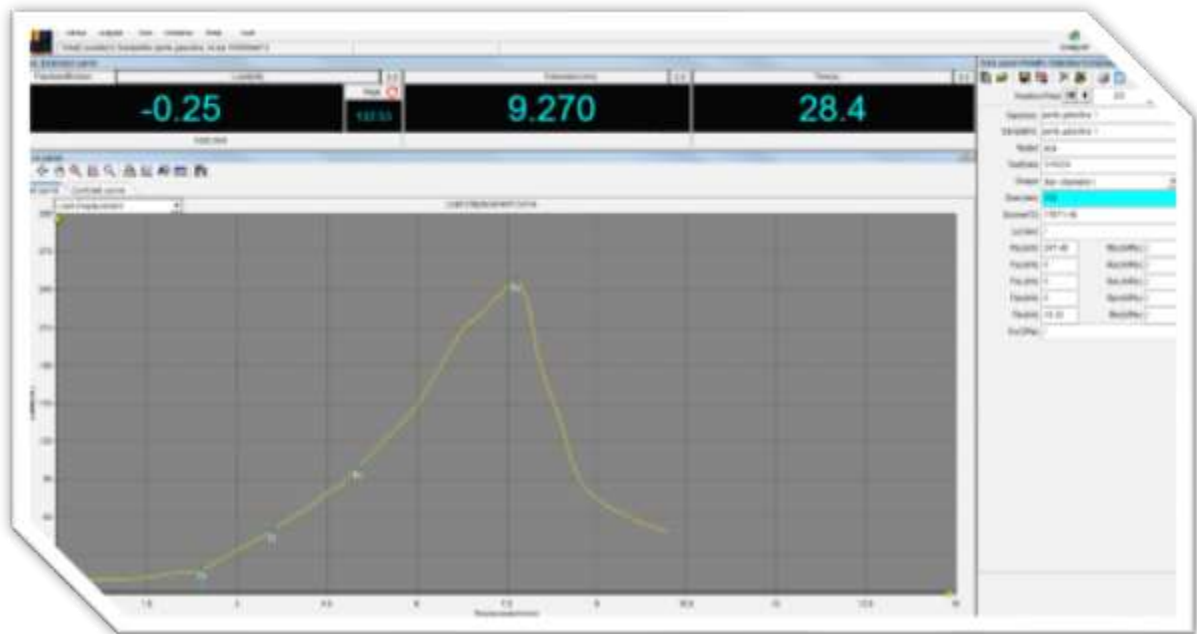


Ilustración 44. Grafica carga-desplazamiento obtenida del equipo CMSUTM-600B.

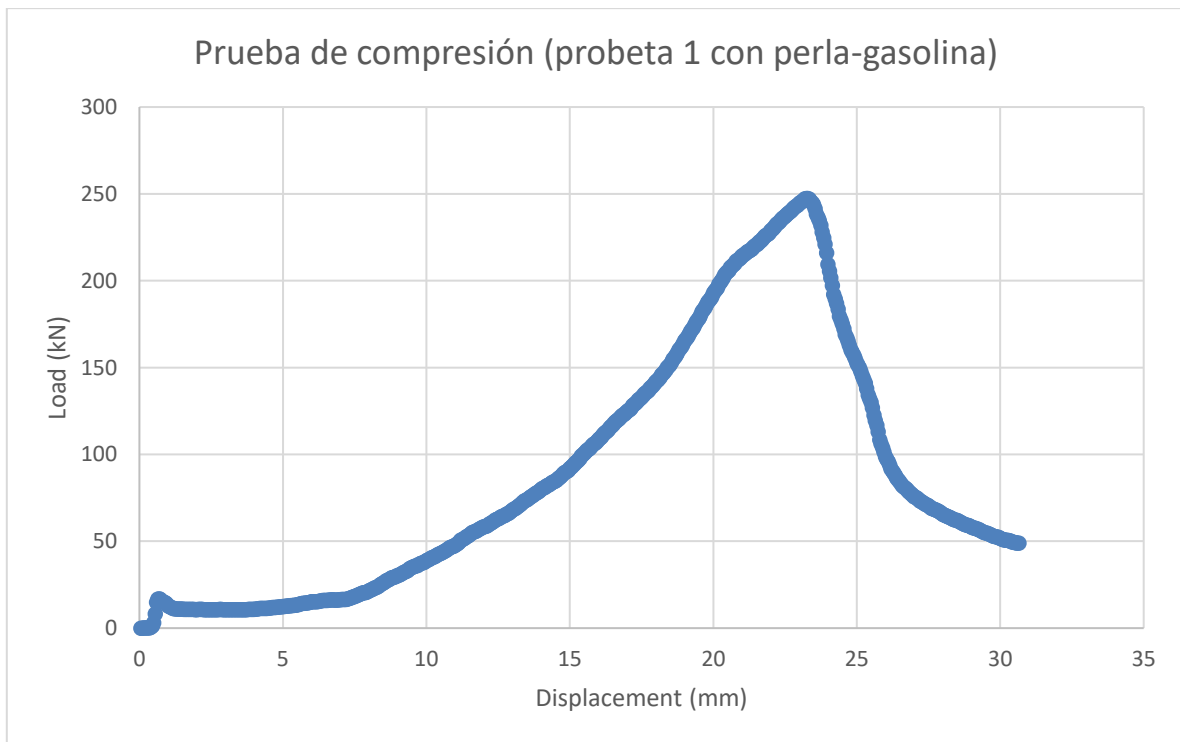


Ilustración 45. Grafica carga-desplazamiento construida en Excel para la probeta (1)

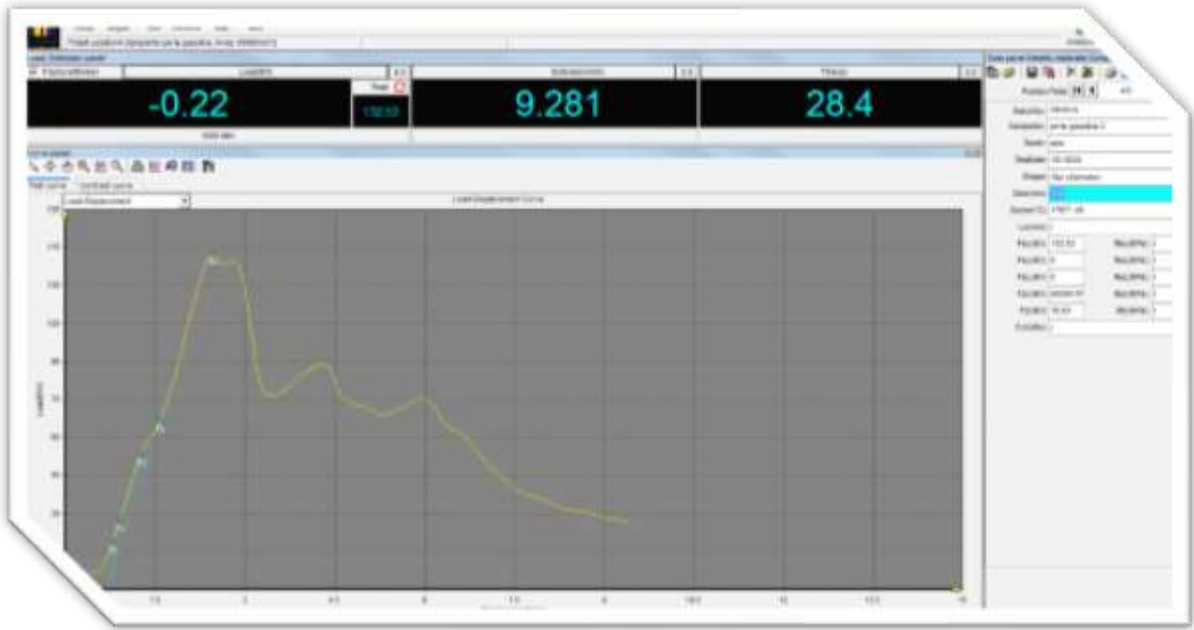


Ilustración 46. Grafica carga-desplazamiento obtenida del equipo CMSUTM-600B.

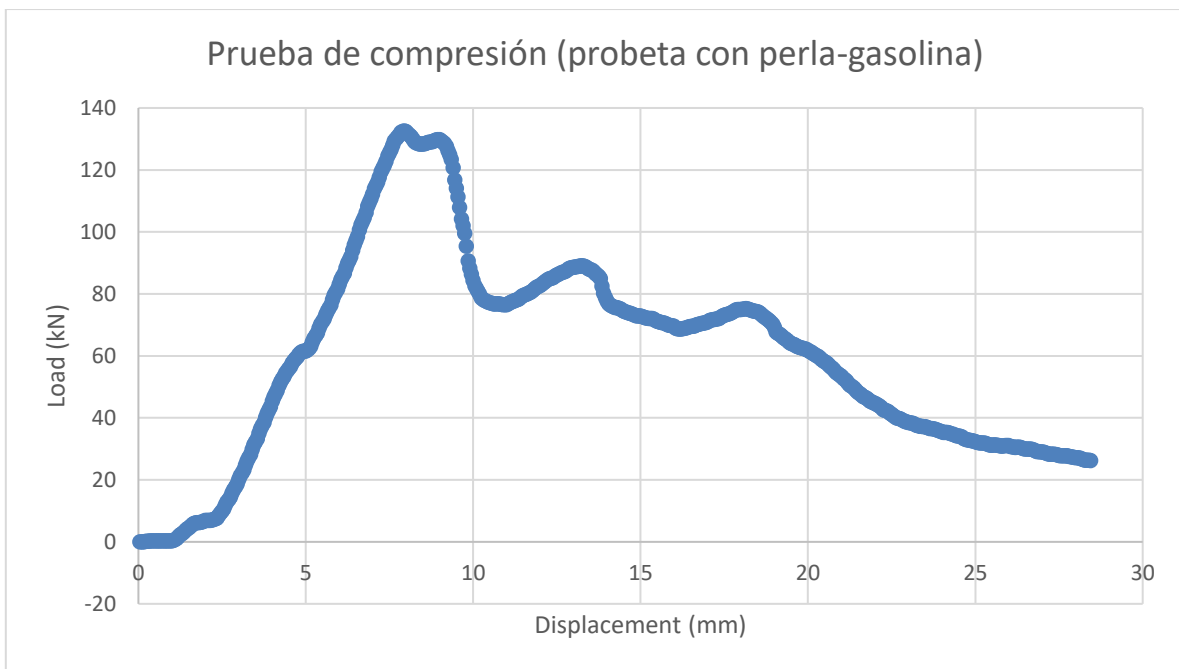


Ilustración 47. Grafica carga-desplazamiento construida en Excel para la probeta (2)

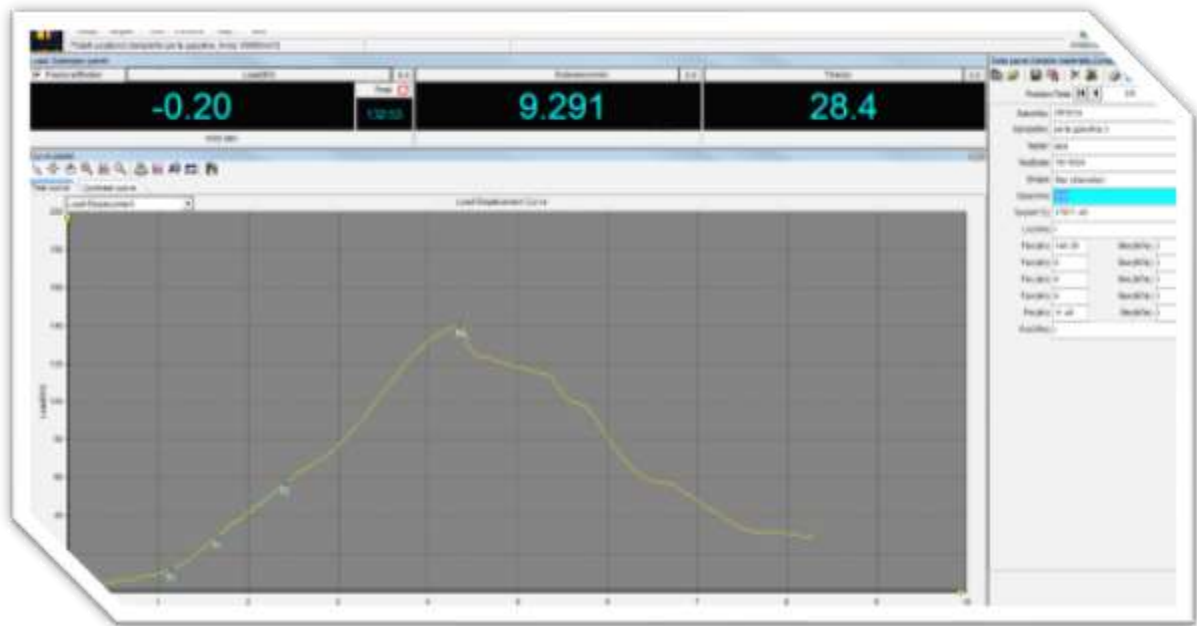


Ilustración 48. Grafica carga-desplazamiento obtenida del equipo CMSUTM-600B.

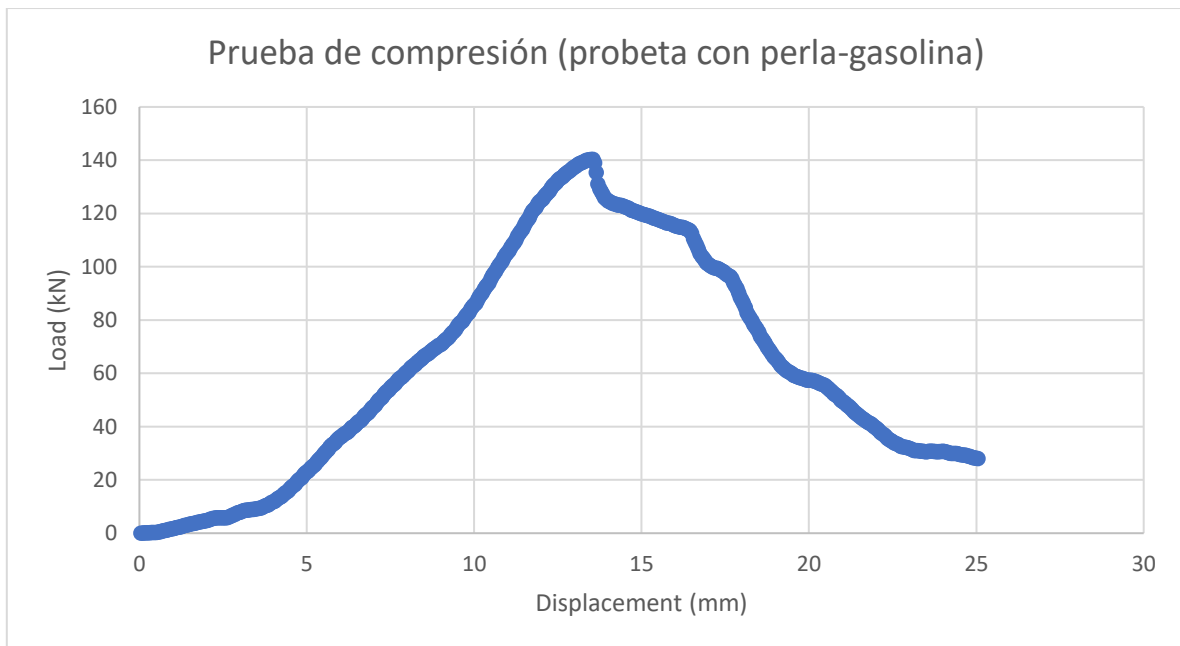


Ilustración 49. Grafica carga-desplazamiento construida en Excel para la probeta (3)

El cálculo de resistencia a la compresión se realizó utilizando la ecuación:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}; A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Ecuación 4. Resistencia a la compresión

Donde:

σ_c es la resistencia a la compresión (MPa)

P es la carga máxima aplicada (N)

A es el área de la sección transversal de la probeta (m²)

Tabla 30. 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

La resistencia media de las 6 probetas es de 9.88 MPa, esto representa un desempeño mecánico moderado, la resistencia media tomando únicamente la probeta (1) polvo con D-limoneno y la probeta (1) perla con gasolina es de 14.13 MPa, estas probetas fueron sumergidas en agua durante 15 minutos antes de realizar el ensayo teniendo un control del contenido de agua de las probetas como lo indica la norma ASTM C39 (véase ilustración 38 a 49), (véase tabla 30).

Prueba en cámara PV1200

Se realizaron probetas de concreto hexagonales, ya siendo adoquines para someterlos a una cámara de pruebas climáticas extremas para ver su comportamiento ante estos cambios de temperaturas.

Los datos para los cálculos se obtuvieron de la hoja de cálculo de Excel acuerdo con los datos de entrada como volúmenes y pesos, cálculo de proporciones en función de las relaciones de disolución y ajuste de la cantidad del solvente requerido (véase tabla 31).

Tabla 31. Determinación de la geometría del adoquín

Propuesta para los adoquines		
Geometría	6	Hexagonal
Área de la figura	78.5918	cm ²
Altura	4.5	cm
Lado	5.5	cm
Perímetro	33	cm
S (longitud de los lados)	5.5	cm
Apotema	4.76	
Volumen	353.6631	cm ³

En caso de añadir un aditivo extra la relación del agua se ajusta en relación con el aditivo como un colorante que sea en polvo que va del 2-5% en peso del cemento (véase tabla 32).

Tabla 32. Determinación de la geometría del adoquín

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

La cantidad del colorante se tomó a partir del promedio entre el rango permitido en porcentaje para este aditivo.

El volumen total se calculó a partir de la suma de los volúmenes resultantes de cada material (véase tabla 33).

Tabla 33. 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	3182.1858	2.1211
2.4	Garnet	833.3333	6750		
2.5	Grava silica 1/8	1200			
1	Agua	600			
0.648	Mezcla polímero/solvente	231.3922			
0.5465	Polímero	13	17	26	0.648
0.75	Gasolina	13			

La densidad de la mezcla polímero/solvente se determinó con la ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 34. 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	13	ml
Peso Gasolina	9.75	gr
Cantidad de polímero	13	ml
peso del polímero	7.1045	gr
Peso total	16.8545	gr

En esta tabla la cantidad de gasolina se puso como referencia para tener un aproximado de las cantidades para el volumen del polímero y el solvente.

Tabla 35. Peso estimado por unidad de adoquín

Densidad de la mezcla	2.1211	g/cm ³
Peso estimado	750.1843	gr
	0.7502	Kg

Como cálculos finales con el peso estimado total de cada pieza, se calcula la cantidad necesaria de cada material para la fabricación de un solo adoquín (véase tabla 36).

Tabla 36. Cantidades finales por cada pieza fabricada

Peso total	0.7502	kg	750.2	gr
Cemento	0.1111	kg	111.1	gr
Garnet	0.2223	kg	222.3	gr
Grava silica 1/8	0.3334	kg	333.4	gr
Mezcla polímero/solvente	0.0167	kg	16.7	gr
Colorante	0.0039	kg	3.9	gr
Agua	0.0667	L	66.7	ml



Ilustración 50. Adoquines para prueba en cámara de cambios climáticos

Se metio un primer adoquin a la cámara de cambios climáticos, despues de 4 días dentro de la cámara el adoquín presento un anomalía que provoco que la prueba

se detuviera, se noto la presencia de burbujas superficiales que salían desde dentro del adoquín (vease ilustracion 51).



Ilustración 51. Presencia de burbujas en el adoquín después de 4 días de prueba en cámara de cambios climáticos

Se procedió a seccionar el adoquín para estudiar con profundidad la presencia de burbujas generadas en la superficie, estas burbujas y la composición estructural del adoquín se revisaron en un estereoscopio (véase ilustración 52 a 54).



Ilustración 53. Interior del adoquín en la zona de la presencia de burbujas

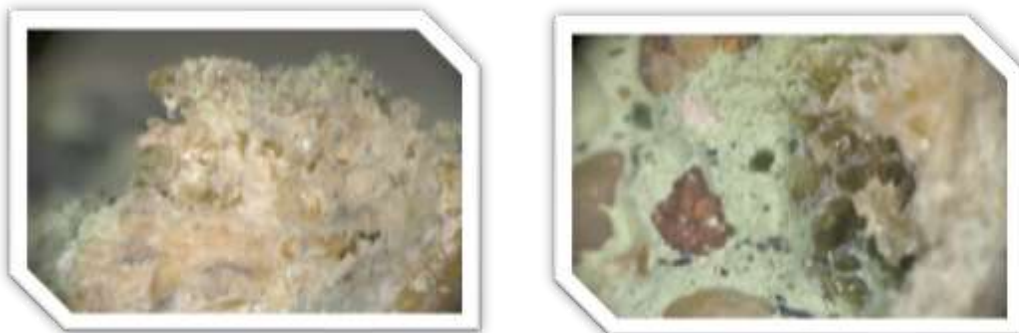


Ilustración 52. Integridad estructural del adoquín

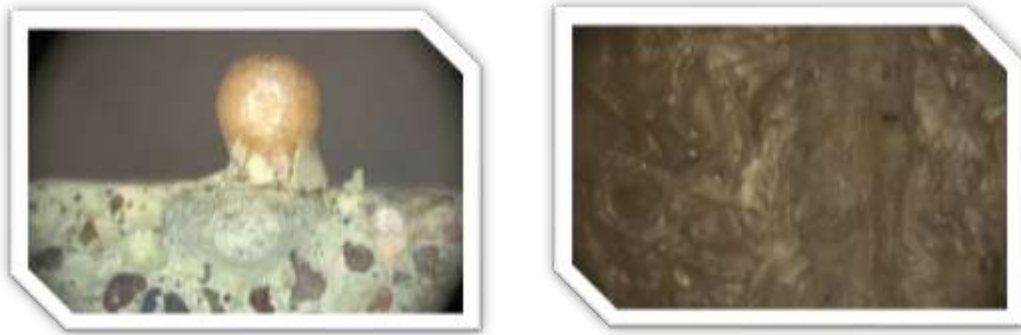


Ilustración 54. Integridad estructuras de las burbujas

Estas burbujas esféricas indican una reexpansión o volatilización parcial de fracciones de gasolina atrapadas presentes en el poliestireno los cuales pueden ser movilizados térmicamente cuando son expuestos bajo ciclos extremos, otra posibilidad se debe a una mala compactación del concreto, una mala homogenización de la disolución entre el polímero y el solvente lo que genera imperfecciones que durante el ciclo de temperaturas altas se inflen y se endurezcan durante los ciclos a bajas temperaturas.

Como parte complementaria del análisis de durabilidad del material, se metió otro adoquín de prueba con las mismas características y proporciones a la cámara PV1200, esta cámara es capaz de reproducir el protocolo de ensayos especificado en la norma ISO-16752-4, esta norma regula los métodos para someter materiales no metálicos a condiciones ambientales extremas, el adoquín permaneció dentro de la cámara durante 15 días, lo cual se traduce a 30 ciclos siendo 12 horas por ciclo.

Al termino de los 30 ciclos, se inspecciono de manera visual y detallada el adoquín de prueba observando lo siguiente:

Integridad estructural: no hay presencia superficial visible de grietas o fisuras.

Cambios de coloración: no se observó ninguna mancha o alteración en la pigmentación del concreto.

Degradación por disgregación: no se presentó desprendimiento de material.

Deformación geométrica: dimensionalmente el adoquín permaneció constante a la vista.

Adherencia del material polimérico: no se presentó segregación ni migración del poliestireno añadido como en la primera corrida de la prueba.

Pérdida de masa: al iniciar la prueba el adoquín pesaba 704.3 gramos, al finalizar su peso fue de 670.1 gramos teniendo una pérdida de masa de 30.8 gramos equivalentes una pérdida porcentual del 4.37% siendo una pérdida aceptable considerando que la prueba estaba diseñada también para eliminar humedad o componentes volátiles no estructurales.



Ilustración 55. Foto comparativa entre 2 adoquines después de cámara PV1200

Ensayo de resistencia a la absorción (ASTM C140)

El ensayo de resistencia a la absorción permitió evaluar la porosidad del material, así como su durabilidad y comportamiento frente a ambientes húmedos utilizando como probeta un adoquín hexagonal.

La metodología utilizada para el ensayo fueron las siguientes:

El adoquín se secó en horno a 110°C durante 24 horas.

Se realizaron pesajes en intervalos de 2 horas para comprobar un peso constante.

Tras alcanzar la masa constante, se tomó el menos peso con diferencias menores a 0.2% como peso seco.

El adoquín se sumergió en agua limpia a temperatura ambiente por 24 horas.

Se seco la superficie el adoquín antes de pesaje en estado saturado.

Tabla 37. 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
Saturado (después de 24h en agua)	24 h inmersión	23	704.72

Peso seco (W_d) = 644.80 gramos (masa constante)

Peso saturado superficialmente seco (W_{ssd}) = 704.72 gramos

Con los datos obtenidos (véase tabla 37) se calculó el porcentaje de absorción de agua, la densidad aparente seca y la densidad en estado saturado superficialmente seco con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Absorción}(\%) = \frac{W_{ssd} - W_d}{W_d} * 100$$

Ecuación 5. Porcentaje de absorción de agua

$$\rho_{seca} = \frac{W_d}{V}$$

Ecuación 6. Densidad aparente seca

$$\rho_{seca} = \frac{W_{ssd}}{V}$$

Ecuación 7. Densidad en estado saturado seco

Tabla 38. 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

Pruebas complementarias

- **Ensayo de resistencia al impacto (caída de bola)**

Condiciones del ensayo

Masa de la bola de acero templado: 833 gramos

Altura de caída sin fuerza adicional 0.70 m

Energía de impacto aplicada:

$$E = m * g * h = 0.833 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.70 \text{ m} = 5.714 \text{ J}$$

Energía de impacto representativa de cargas accidentales comunes en entornos urbanos y de jardinería.

Superficie del ensayo rígida, no absorbente

Numero de impactos totales en toda la superficie del adoquín: 6

Ninguno de los 6 impactos genero daño significativo en la pieza, solamente se aprecia muy de cerca la zona de impacto de la bola, el área afecta no sufrió grietas ni fisuras soportando el daño desde la altura del ensayo.

El adoquín presenta un buen comportamiento para absorber energía sin comprometer su integridad estructural (véase ilustración 56).



Ilustración 56. Evaluación visual del adoquín después de los impactos de la caída de bola

- **Ensayo de abrasión superficial (desgaste por fricción con lija)**

Condiciones del ensayo tabla 39.

Tabla 39. 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)

Tabla 40. 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

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 (véase tabla 40).

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.



Ilustración 57. Adoquín después de 500 ciclos de lijado

- **Observación de interfaz solvente-polímero-cemento (análisis estructural visual)**

El objetivo de analizar un fragmento del adoquín fue caracterizar la calidad de la microestructura de la matriz solvente-polímero-cemento buscando la presencia de posibles defectos como vacíos, porosidad excesiva, segregación del polímero o fisuras las cuales pudieran comprometer las propiedades mecánicas de los adoquines (véase tabla 41).

Tabla 41. Condiciones de preparación de la muestra para análisis de microestructura

Parámetro	Detalle específico
Cemento utilizado	Portland gris
Relación agua/cemento	0.60
Agregado grueso	Grava silica angular
Agregado fino/adicional	Garnet
Agregado reciclado	0.15 partes de polvo de poliestireno disueltos en gasolina
Pigmento	Verde para concreto
Proporción de mezcla	Cemento: polímero disuelto = 1:0.15
Curado	No curado, endurecido al aire

Imagen microscópica a una magnificación x5.

Se observó una matriz cementante pigmentada continua y sin interrupciones estructurales visibles, los agregados sólidos (grava silica y garnet) se pueden apreciar en forma de granos que presentan una distribución uniforme y bien incrustados en el cemento, se notó presencia de poros aislados de morfología redondeada aleatoriamente distribuidos en el adoquín, no hay segregación visible del polímero (véase ilustración 58).



Ilustración 58. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x5

Imagen microscópica a una magnificación x20.

La interfaz entre la matriz cementante y el polímero es nítida y continua sin evidencia de des adherencia, se puede apreciar una buena compactación densa, compatible y con presencia de materiales densos como el garnet, estas partículas densas no muestran señales de microfracturas o transiciones debilitadas, no hay presencia reconocible de restos del polímero no disuelto a nivel microscópico (véase ilustración 59).

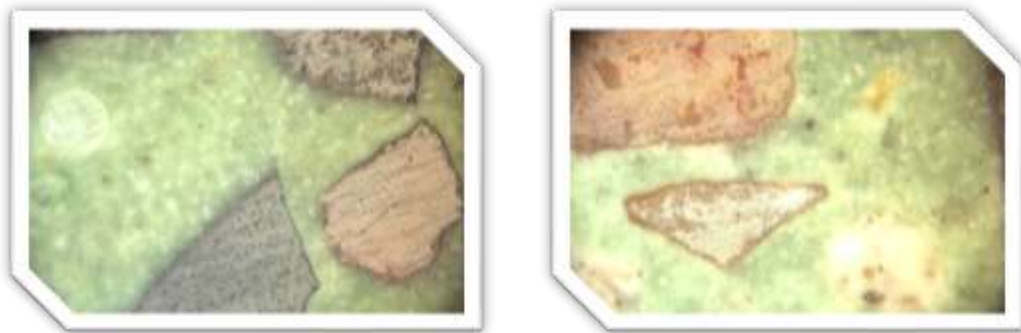


Ilustración 59. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x20

Imagen microscópica a una magnificación x50.

Se observan puntos de pigmentos encapsulados dentro del cemento que no afectan la continuidad de la matriz, no hay presencia de micro fisuras, reforzando la buena calidad de la interfaz de la matriz cementante (véase ilustración 60).

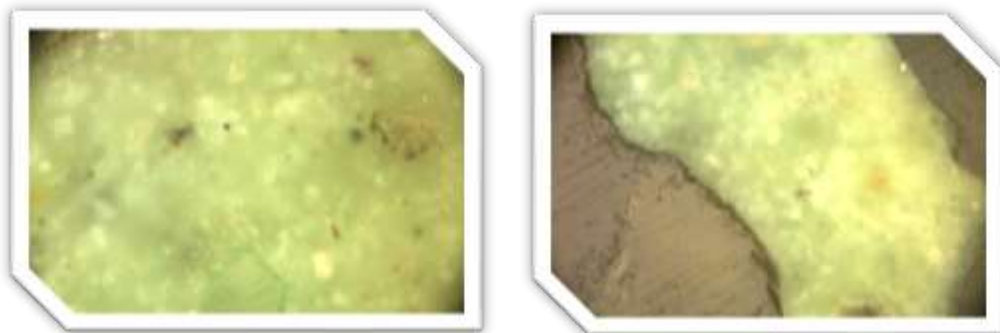


Ilustración 60. Microestructura de la matriz polímero/solvente-cemento en un aumento x50

- **Ensayo de resistencia química (en ambiente agresivo)**

Se realizó la evaluación final de los adoquines transcurridos los 7 días del ensayo (168 h), bajo un ambiente constante, bajo resguardo de una campana de extracción (véase ilustración 61 y 62).

Las muestras se lavaron con agua DI y se dejaron secar por 1 hora.

No hubo recambio de soluciones y la única solución que se mantuvo cubierta fue el ácido clorhídrico.

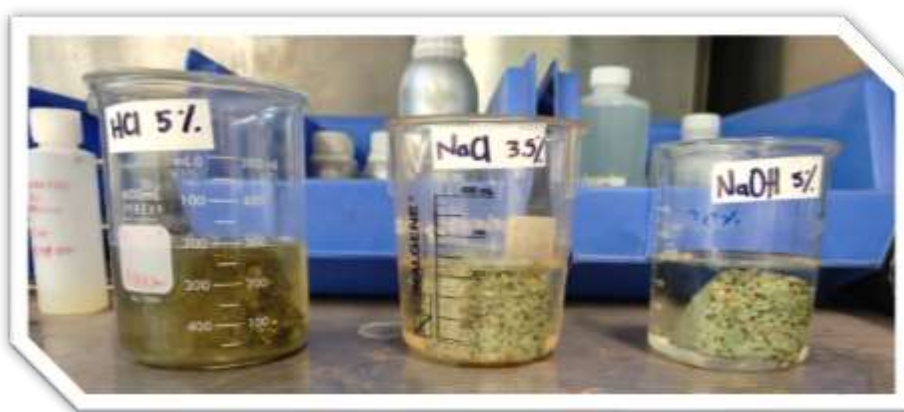


Ilustración 61. Ensayo de resistencia química durante 7 días

Tabla 42. Resultados de pérdida de masa

Solución	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δm (g)	Δm (%)
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%



Ilustración 62. Muestras del ensayo química transcurridos los 7 días

El fragmento expuesto a HCl al 5% tuvo el mayor deterioro físico observable, la solución adquirió un tono verdoso debido al colorante utilizado en la matriz de adoquín y se formaron depósitos sólidos en el fondo del recipiente. Al terminar el ensayo, el fragmento de adoquín quedó debilitado estructuralmente, con golpes suaves, la muestra se desmoronó llegando a tener un peso final de 92.6001 gramos, lo que resulta en una pérdida de masa de 22.1507 gramos correspondientes al 19.3033%, indicando una pérdida crítica de cohesión estructural (véase tabla 42).

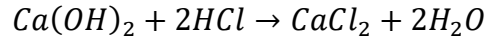
En el caso del NaOH al 5%, a pesar de haber tenido una pérdida de masa del 3.39%, no se observó algún cambio visible de deterioro superficial o pérdida en su resistencia estructural, lo que indica que en medio básico solo se ve afectado superficialmente sin atacar directamente la matriz cementante (véase tabla 42).

La muestra expuesta a salmuera al 3.5% (NaCl) mostró la menor pérdida de masa (0.67%) y no presentó degradación superficial visible, se observó la formación superficial de cristales salinos que no afectan la integridad del adoquín, dando un buen desempeño frente a ambientes salinos o marinos (véase tabla 42).

Interpretación del daño en medio ácido

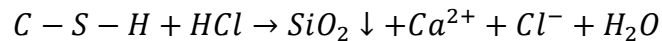
Mecanismos de ataque ácido al adoquín.

- Disolución de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), producto de la interacción del agua con el cemento:



Ecuación 8. Disolución de portlandita

- Descomposición del C-S-H (Calcium Silicate Hydrtae) es el producto principal de hidratación del cemento Portland y el encargado de la resistencia mecánica y cohesión estructural del cemento, liberando calcio y dejando una estructura rica en sílice amorfa, son cohesión:



Ecuación 9. Descomposición del C-S-H

- Lixiviación del calcio estructural generando una matriz porosa y débil que fue incapaz de mantener unidos los agregados, en conjunta todas las reacciones destruyen la red cementante del adoquín (véase ilustración 63).



Ilustración 63. Muestra deteriorada por HCl

Preparación de adoquines finales

Se realizaron un adoquín hexagonal de acuerdo con los datos obtenidos en Excel (véase tabla 43).

Tabla 43. Determinación de la geometría del adoquín

Propuesta para los adoquines		
Geometría	6	Hexagonal
Área de la figura	166.2768	cm ²
Altura	5	cm
Lado	8	cm
Perímetro	48	cm

S (longitud de los lados)	8	cm
Apotema	6.93	
Volumen	831.3843	cm ³

En caso de añadir un aditivo extra la relación del agua se ajusta en relación con el aditivo como un colorante que sea en polvo que va del 2-5% en peso del cemento (véase tabla 44).

Tabla 44. Proporciones estándar para la fabricación del mortero

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

El volumen total se calculó a partir de la suma de los volúmenes resultantes de cada material.

Tabla 45. Calculo 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	3182.1858	2.1211
2.4	Garnet	833.3333	6750		
2.5	Grava silica 1/8	1200			
1	Agua	600			
0.648	Mezcla polímero/solvente	231.3922			

0.5465	Polímero	30.5	40	61	0.648
0.75	Gasolina	30.5			

La densidad de la mezcla polímero/solvente se determinó con la ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 46. 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

En esta tabla la cantidad de gasolina se puso como referencia para tener un aproximado de las cantidades para el volumen del polímero y el solvente.

Tabla 47. Peso estimado por unidad de adoquín

Densidad de la mezcla	2.1211	g/cm ³
Peso estimado	1763.5188	gr
	1.7635	Kg

Como cálculos finales con el peso estimado total de cada pieza, se calcula la cantidad necesaria de cada material para la fabricación de un solo adoquín (véase tabla 48 e ilustración 64).

Tabla 48. 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



Ilustración 64. Adoquín para jardín presentación final

Evaluación del impacto económico de adoquines con polvo de EPS

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 (véase tabla 50).

Se analizaron costos unitarios, la composición, la resistencia mecánica y otras propiedades físicas con la finalidad de determinar la viabilidad económica y sustentable del uso de agregados reciclados en materiales constructivos.

La mano de obra y energías fueron propias sin costo declarado, el curado fue por 28 días sin uso de hornos, solamente temperatura ambiente.

Descripción del adoquín experimental:

Tabla 49. Datos informativos del adoquín experimental

Forma	Hexagonal
Altura	5 cm

Lado	8 cm
Volumen	831.384 cm ³
Masa seca	1.7635 Kg
Materiales	Precio por unidad (MNX)
Cemento Portland	7.84
Garnet	-
Grava silica	-
Polvo de poliestireno	-
Gasolina	0.73
Agua	0.1568
Molde	5
Total	13.7268

Tabla 50. 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

Las fuentes de información para esta evaluación fueron catálogos técnicas y tiendas en línea.

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 jardinería 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%

Discusión

El objetivo de este trabajo fue fabricar un material decorativo con el fin de poder reciclar desechos como el polvo de poliestireno generado durante las etapas de proceso del poliestireno expandido o las perlas antes de expandir que son contaminadas mediante una disolución con solventes que ayuden a la completa homogenización, además de incorporar materiales como grava sílica y garnet en lugar de los agregados convencionales dándole un mayor valor agregado al producto debido a la utilización de estos materiales catalogados como residuos industriales. Los adoquines fabricados alcanzaron una compresión media de 14.3 MPa considerando solamente las primeras probetas de cada disolución (polvo de poliestireno en D-limoneno y perla contaminada en gasolina) este valor queda fuera del rango para estructuras vehiculares o de altas cargas ya que la norma ASTM C936 exige una resistencia a la compresión >35 MPa para pavimentos estructurales sin embargo puede clasificarse como un adoquín decorativo de uso no estructural apropiado para zonas de jardinería o senderos, otras normas latinoamericanas como la NTG 41017 de Guatemala clasifica estos concretos como "Clase C", destinados a tránsito peatonal muy ligero o uso estético, contando con un rango de 12 a 20 MPa.

A diferencia de las marcas comerciales como Tabicel, Superblock o Dublock soportan cargas entre 20 y 39 MPa los valores inferiores se deben a la inclusión de material reciclado y la reducción del contenido cementante.

La absorción de agua obtenido arrojó un valor del 9.29% superando el valor límite recomendado de 7% para adoquines estructurales de acuerdo con la NMX-C-414-ONNCCE, este valor aún se mantiene dentro del rango aceptado para materiales decorativos que no estén sometidos constantemente a climas con ciclos de congelación, en condiciones exteriores de jardinería no se presenta un riesgo estructural inmediato, de acuerdo con la UNE EN 1338 un adoquín de uso peatonal o de jardinería debe contener un porcentaje de absorción de agua menor o igual al 12%.

El costo significativo por unidad del adoquín ronda entre los \$20 MNX contra los valores de mercado que van desde \$18 - \$22 MNX, el valor por metro cuadrado incrementa debido a la geometría y el tamaño de cada adoquín, es posible aumentar el tamaño del adoquín ajustándolo a las dimensiones de sus competidores directos, así como la geometría que sea requerida simplemente ajustando el molde.

Además, este adoquín ofrece una ventaja ambiental al reutilizar desechos contaminantes provenientes de líneas de producción lo que reduce su impacto y la acumulación de estos.

El comportamiento del adoquín frente a cambios extremos de temperatura fue estable durante los 30 ciclos que duró la prueba, lo cual sugiere que el mortero, en combinación con los agregados minerales (garnet y grava silica), y la incorporación del polímero disuelto, otorgaron una buena resistencia a choques térmicos, y pruebas dinámicas, el adoquín es candidato a ser sometido por un periodo de tiempo más prolongado lo que refuerza el potencial del material como alternativa viable en aplicaciones en ambientes exteriores con variabilidad térmica considerable.

Pruebas complementarias corroboraron la buena calidad de la mezcla teniendo una interfaz polímero-solvente-cemento consolidada con baja porosidad, resistente a impactos dinámicos y buena resistencia a la abrasión, siendo útil en ambientes salinos o marinos, pero no ante presencia de medios ácidos.

Recomendaciones técnicas:

- Homogenizar la disolución entre polímero – solvente antes de la incorporación al mortero.
- Optimizar las proporciones entre el cemento y el polímero para conseguir una matriz compacta sin perder sus propiedades.
- Reducir la porosidad superficial mejorando la compactación en el moldeo.
- Aplicar recubrimientos o selladores que disminuyan absorción de agua en exteriores.
- Evaluar agregados diferentes como ceniza volante, puzolana natural o escoria molida como sustituyentes a los agregados convencionales.
- Adaptar normativa para adoquines de uso en jardinería en México debido a la falta de información técnica local.

Para lograr una mejor resistencia a la compresión se puede controlar la relación agua/cemento para obtener una estructura menos porosa y compacta, ya que si la mezcla es muy seca se pueden usar técnicas de compactación, el curado es crucial para la resistencia, un curado húmedo por inmersión por 7 días o cubrir la mezcla con plástico húmedo los primeros 3 días son alternativas que pueden lograr una resistencia de hasta 25 – 30 MPa después de 28 días de un curado controlado con buena dosificación.

Conclusión

El desarrollo de la tesis demuestra que es viable desde un enfoque técnico reutilizar desechos derivados de la producción de poliestireno expandido principalmente la perla contaminada y el polvo mediante una disolución en solventes altamente compatibles con este polímero, e integrarlos como nuevo agregado en morteros de concreto para elaborar adoquines para jardinería o decoración. La selección de los agregados, aditivos y el diseño de la mezcla adecuada permitió obtener un producto con un buen valor agregado con buena resistencia mecánica, baja porosidad y buena estabilidad frente a condiciones climáticas extremas, así como una buena interfaz y relación solvente-polímero-cemento a nivel de microestructura siendo resistente a desgaste por fricción y buena resistencia química.

Desde un punto de vista ambiental, la propuesta ofrece reutilizar residuos sólidos difícilmente reciclables, reduciendo su acumulación bajando el impacto de contaminación en ecosistemas naturales, desde un punto de vista económico, este proceso puede escalarse industrialmente, enfocada en sectores interesados en el desarrollo de nuevos materiales de construcción sostenibles.

Por lo tanto, la incorporación de residuos derivados del poliestireno expandido contribuye al desarrollo de nuevos materiales con aplicaciones reales en el ámbito urbano, paisajístico y vial.

Bibliografía

1. Agilent Technologies. (2023). Applications in polymeric materials. Recuperado de [agilent.com](https://www.agilent.com)
2. American Concrete Institute (ACI). (2019). Concrete paving unit standard practices. Detroit, MI: ACI Publications.
3. ASTM International. (1999). ASTM C39/C39M-99: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
4. ASTM International. (2025). ASTM C944: Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting. ASTM International.
5. ASTM International. (2017). ASTM C140: Standard methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. ASTM International.
6. ASTM International. (2020). ASTM C39/C39M-99: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
7. ASTM International. (2021a). ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International.
8. ASTM International. (2019). ASTM C779/779M-19: Standard Test Method for Abrasion Resistance of horizontal Concrete Surfaces. ASTM International.
9. ASTM International. (2010). ASTM D4272-10: Standard Test Method for Impact Resistance of Thermoset Laminates. ASTM International.
10. ASTM International. (2020). ASTM C267-20: Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars. ASTM International.

11. 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.
12. UNE-EN 1338. (2004). Concrete paving blocks – Requirements and test methods. Asociación Española de Normalización
13. Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
14. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10^a ed.). Wiley.
15. Cerablast. (s. f). Arena de granate (garnit)-Cerablast. Recuperado de <https://cerablast.com/es/arena-de-granate-garnit7>
16. CEmix. (s. f). Ficha técnica color para cemento. CEMIX
17. CTS Clima Temperature System GmbH. (2022). Operating manual – Climate test chamber PV1200. CTS GmbH.
18. 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>
19. García, J., & Pérez, M. (2021). Innovación en materiales para pavimentos urbanos. *Journal of Urban Engineering*, 35(2), 123-134.
20. González, L., & Torres, P. (2021). Estudio de la resistencia mecánica en adoquines reforzados con EPS. *International Journal of Civil Engineering*, 29(3), 63-70.
21. Hamis, S. H. (Ed.). (2000). *Handbook of polymer degradation* (2^a ed.). Marcel Dekker.
22. 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.
23. Hormipisos. (s. f). Adoquines: Elegancia duradera en cada paso. Recuperado de <https://www.hormipisos.com>

24. ISO. (2010). ISO 16750-4: Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – part 4: Climatic loads. International Organization for Standardization.
25. ISO 697-1. (1981). Rubber, raw – Determination of density – Part 1: General test method. Geneva: International Organization for Standardization.
26. Idesa Petroquímica - Perla de EPS. (s. f). Recuperado de <https://www.idesapetroquimica.com/es>
27. Jones, L., Smith, R., & Taylor, P. (2020). Recycled materials in paving systems. *Construction Materials Review*, 28(4), 89-97.
28. Jones, M. R., Waghorn, R., & Soutsos, M. N. (2020). Use of EPS waste in concrete and construction materials. *Construction and Building Materials*, 234, 117293.
29. Kumar, V., Gupta, S., & Rao, A. (2021). Utilization of expanded polystyrene in concrete paving blocks. *Sustainable Construction Research*, 19(3), 67-75.
30. Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2^a ed.). CRC Press.
31. 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.
32. Metha, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4^a ed.). McGraw-Hill Education.
33. Méndez, J., Silca, T. (2022). Resistencia y degradación de adoquines de EPS en entornos externos. *Building and Environment Journal*, 28(3), 89-95.
34. Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10^a ed.). Willey
35. 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>
36. NAPCOR. (2021). Expanded polystyrene recycling – A review of methods and applications. National Association for PET Container Resources.
37. Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5^a ed.). Pearson Educational Limited.

38. ONNCE. (2010). NMX-C-263-ONNCE: Determinación de masa específica, absorción y vacíos. ONNCE.
39. ONNCE. (2013). NMX-C-036-ONNCE: Compresión de adoquines. ONNCE.
40. Pérez, R., Morales, D., & López, G. (2018). Poliestireno expandido en aplicaciones estructurales: Un estudio sobre el impacto mecánico en adoquines. *Construction Materials Journal*, 15(1), 120-130.
41. Polystyrene Surface. (s. f). nanoComposix. Recuperado de <https://nanocomposix.com/pages/polystyrene-surface>
42. Polymer Degradation and Stability. (2020). Elsevier.
43. Repositorio Universidad Libre. (2023). Análisis del comportamiento de adoquines con mortero de EPS. Recuperado de repository.unilibre.edu.co
44. Ruiz, F., & García, M. (2019). Polímeros en la construcción: Aplicaciones del EPS en adoquines de bajo impacto. *Materials Science and Engineering Journal* 24(4), 84-91.
45. Sánchez, R., & Romero, M. (2004). *Materiales de construcción: Propiedades y ensayos*. Editorial LIMUSA.
46. Scheirs, J. (2003). *Polystyrene: Synthesis, production and applications*. John Wiley & Sons.
47. Shah, S. J., Naeem, A., Hejazi, F., Mahar, W. A., & Haseeb, A. (s. f). Experimental investigation of mechanical properties of concrete mix with lightweight expanded polystyrene and steel fibers. *CivilEng*, 5(1), 209-223. <https://doi.org/10.3390/civileng5010011>
48. Shayan, A., & Xu, A. (2004). Value-added utilization of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81-89.
49. Singh, N., Kaur, P., & Singh, J. (2021). Effect of silica sand as fine aggregate replacement in concrete. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 6(2), 45-53.
50. Singh, R. P., & Jain, K. (2017). Performance of waste plastic/polymer modified bituminous mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 601-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.034>

51. Smith, J. (2022). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene. *Journal of Polymer Science* 60(8), 112-126.
<https://doi.org/10.1002/pol.12345>
52. Soto, A., & Fernández, E. (2019). Sustitutos ecológicos en la industria de la construcción: Comparación entre gasolina y D-limoneno en adoquines con EPS. *Journal of Green Engineering*, 16(2), 70-80.
53. Steel Reinforcement Institute. (2015). Guidelines for recycling polystyrene in construction materials. Steel Reinforcement Institute.
54. Van Krevelen, D. W., & Te Nijenhuis, K. (2009). *Properties of polymers* (4^a ed.). Elsevier.
55. Vega, M., & López, P. (2020). *Ánisis del impacto ambiental del uso de poliestireno en materiales de construcción*. *Sustainability in Materials Science*, 5(1), 12-25.
56. Wang, Z., & Li, Q. (2028). Influence of EPS on mechanical and thermal properties of concrete. *Materials and Structures*, 51(1), 120-131.
57. Xue, Z., & Zhang, M. (2021). Recycled expanded polystyrene as lightweight aggregate in concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 34, 101954.
58. Youssef, M., & Hamdy, M. (2020). Effect of recycled polystyrene on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118422.