



UNIVERSIDAD DE BURGOS

Prefabricados de cemento aligerados con
residuos poliméricos industriales

SARA GONZÁLEZ MORENO

Directora: Dra. Verónica Calderón Carpintero

Codirectora: Dra. Raquel Arroyo Sanz

A ti, papá, por ser mi ejemplo.

A ti mamá, por estar siempre ahí

A mi hermano por su confianza ciega en mí.

Y a todos mis amigos por acompañarme en cada paso del camino.

Agradecimientos

Me gustaría dedicar estas líneas a expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, han contribuido al desarrollo de este trabajo, tanto desde el ámbito científico-técnico como desde el humano.

En primer lugar, mi gratitud al Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, que me ha proporcionado el marco académico y profesional necesario para llevar a cabo esta tesis. En especial, deseo destacar a Verónica y Raquel, cuya guía, apoyo y constante ánimo han sido esenciales en cada etapa de este proceso.

Al equipo del Laboratorio de Materiales de Construcción, por su valiosa colaboración técnica y su ayuda, en especial a Sara e Isabel, cuya profesionalidad y apoyo han sido claves para el desarrollo de esta investigación.

A mi familia, en particular a mi padre, por su fuerza, confianza y apoyo incondicional, que han sido mi mayor motivación para alcanzar este objetivo.

También a mis amigos, por estar siempre presentes con su confianza y respaldo, y a Rocío, quien en los momentos más difíciles supo brindarme su ayuda y devolverme la confianza necesaria para seguir adelante.

A todos, gracias de corazón por ser parte de este camino y por ayudarme a hacer realidad este momento.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad técnica y ambiental de utilizar residuos industriales de poliuretano como sustitutos del árido en la producción de prefabricados de cemento, centrándonos en adoquines, bloques y baldosas aligeradas. Esta alternativa pretende promover la economía circular en el sector de la construcción, reduciendo el consumo de recursos naturales y minimizando los residuos enviados a vertederos.

El estudio se estructura en una fase experimental exhaustiva que incluye la caracterización de las materias primas, el diseño de mezclas con diferentes dosificaciones y la fabricación de prototipos. Todos los ensayos siguen normas europeas para evaluar propiedades físico-mecánicas clave como densidad aparente, dureza superficial, resistencia a compresión y flexión, comportamiento hídrico, resistencia al desgaste, reacción al fuego, permeabilidad al vapor de agua, y conductividad térmica, así como para pruebas de envejecimiento acelerado frente a ciclos de hielo-deshielo y cristalización salina. Las pruebas se han llevado a cabo tanto en muestras de referencia como en aquellas con elevados porcentajes de residuos de polímero como sustituto del árido.

Los resultados muestran una reducción significativa en la densidad, facilitando su manejo y transporte, sin comprometer otras propiedades como la resistencia mecánica y frente al fuego requeridas por la normativa vigente. El análisis del ciclo de vida (ACV) determina que la inclusión de estos subproductos reduce la huella de carbono, evidenciando una menor emisión de gases de efecto invernadero y optimizando el consumo energético.

Como parte del proyecto, se ejecuta un demostrador real instalando los adoquines y bloques bajo condiciones operativas en situación real de prestación. Los resultados confirman la funcionalidad y durabilidad de estos materiales. Asimismo, se ha llevado a cabo una prueba piloto en colaboración con una empresa para evaluar la viabilidad técnica y el rendimiento de las baldosas de cemento con residuos de poliuretano. Se obtienen piezas siguiendo los procesos de mezclado, moldeado y compactado directamente en fábrica, presentando resultados muy prometedores con mejoras en resistencia, adherencia, desgaste y durabilidad.

En resumen, esta Tesis Doctoral aporta soluciones innovadoras y aplicadas para el aprovechamiento de residuos industriales de base polimérica, destacando el potencial de esta estrategia para reducir el impacto ambiental del sector de la construcción, alineándose con los principios de la economía circular y la gestión responsable de materiales.

Abstract

The present research aims to evaluate the technical and environmental feasibility of using industrial polyurethane waste as a substitute for aggregate in the production of cement-based precast elements, focusing on pavers, blocks, and lightweight tiles. This alternative seeks to promote circular economy practices in the construction sector by reducing the consumption of natural resources and minimizing the volume of waste sent to landfills.

The study is structured into a comprehensive experimental phase that includes raw material characterization, mix design with different dosages, and prototype manufacturing. All tests adhere to European standards to evaluate key physical-mechanical properties such as bulk density, surface hardness, compressive and flexural strength, water behavior, wear resistance, fire reaction, water vapor permeability, and thermal conductivity. Additionally, accelerated aging tests were conducted to assess resistance to freeze-thaw cycles and salt crystallization. These tests were performed on both reference samples and those incorporating high percentages of polymer waste as aggregate replacement.

The results demonstrate a significant reduction in density, facilitating handling and transportation without compromising other properties such as mechanical strength and fire resistance required by current regulations. A life cycle assessment (LCA) confirms that incorporating these by-products reduces the carbon footprint, showing lower greenhouse gas emissions and optimized energy consumption.

As part of the project, a real-scale demonstrator was executed, installing pavers and blocks under operational conditions in a real-world performance scenario. The results confirm the functionality and durability of these materials. Additionally, a pilot test was carried out in collaboration with a company to evaluate the technical feasibility and performance of cement tiles with polyurethane waste. Pieces were manufactured using factory-based mixing, molding, and compacting processes, showing very promising results with improvements in strength, adhesion, wear resistance, and durability.

In summary, this Doctoral Thesis provides innovative and practical solutions for the utilization of polymer-based industrial waste, highlighting the potential of this strategy to reduce the environmental impact of the construction sector. It aligns with the principles of the circular economy and responsible waste management.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO	1
1.2	ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
2	ESTADO DEL ARTE	9
2.1	ECONOMÍA CIRCULAR	9
2.2	RESIDUOS POLIMERICOS	14
2.3	ADOQUINES	19
2.4	BLOQUES DE HORMIGÓN	22
2.5	BALDOSAS	24
3	OBJETIVOS	29
3.1	OBJETIVOS GENERALES	29
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
4	EXPERIMENTAL	33
4.1	ASPECTOS VISUALES	33
4.2	DENSIDAD APARENTE	33
4.3	DUREZA SUPERFICIAL	33
4.4	ABSORCIÓN DE AGUA	34
4.5	RESISTENCIAS MECÁNICAS	35
4.5.1	Resistencia mecánica en adoquines	35
4.5.2	Resistencia mecánica en bloques	36
4.6	RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN	38
4.7	RESISTENCIA AL HIELO/DESHIELO	38
4.8	CRISTALIZACIÓN DE SALES	39
4.9	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO/RESBALAMIENTO SDRV	39
4.10	RESISTENCIA AL FUEGO. ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD	40
4.11	PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA	42
5	CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	46
5.1	CEMENTO	46
5.2	ÁRIDO SILÍCICO	46

5.3	AGUA	50
5.4	ESPUMA DE POLIURETANO	51
5.5	ADITIVOS	54
6	ADOQUINES DE CEMENTO ALIGERADOS CON RESIDUOS INDUSTRIALES DE POLIURETANO	58
6.1	PROCESO DE ELABORACIÓN	58
6.1.1	Dosificaciones	60
6.2	CARACTERIZACIÓN	60
6.3	CONCLUSIONES DE LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES	64
7	BLOQUES DE CEMENTO ALIGERADOS CON RESIDUOS INDUSTRIALES DE POLIURETANO	68
7.1	PROCESO DE ELABORACIÓN	68
7.1.1	Dosificaciones	69
7.2	CARACTERIZACIÓN	70
7.3	CONCLUSIONES DE LA FABRICACIÓN DE BLOQUES.....	74
8	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	78
8.1	INTRODUCCIÓN	78
8.2	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	78
8.2.1	Alcances	79
8.2.2	Fases.....	79
8.2.3	Flujos de referencia y Límite del sistema	81
8.2.4	Análisis de impactos evaluados.....	81
8.2.5	Categorías de impacto	82
8.3	ANÁLISIS DE IMPACTO DEL ACV DE LOS ADOQUINES	83
8.3.1	Conclusiones	85
8.4	ANÁLISIS DE IMPACTO DEL ACV DE LOS BLOQUES.....	86
8.4.1	Conclusiones	88
8.5	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	88
9	PUESTA EN OBRA. DEMOSTRADOR	93
9.1	INTRODUCCIÓN	93
9.2	PROTOTIPO	93
9.3	EJECUCIÓN. PUESTA EN OBRA.....	95

9.4	EVOLUCIÓN Y RESULTADOS.....	97
9.4.1	Aspectos visuales.....	97
9.4.2	Dureza Shore C.....	99
9.4.3	Dureza Shore en adoquines.....	102
9.4.4	Dureza Shore en bloques.....	102
10	PRUEBA PILOTO	107
10.1	INTRODUCCIÓN	107
10.2	PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN	107
10.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	108
11	CONCLUSIONES FINALES	115
11.1	CONCLUSIONES PRINCIPALES	115
11.2	LIMITACIONES	117
12	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	121
13	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO		139

Capítulo

01

Introducción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

La industria mundial de polímeros y plásticos ha mostrado un crecimiento constante desde su invención a finales del siglo XIX, impulsado por su amplia aplicación en diversos sectores. Aunque en Europa la producción se ha estabilizado, con cifras cercanas a 55 millones de toneladas métricas anuales, la contribución de este continente al mercado global ha disminuido, representando aproximadamente el 15% de la producción mundial. A nivel global, en 2022, la producción total de plásticos alcanzó cerca de 400 millones de toneladas, destacando el papel de países como China, que lidera con el 32% de la producción global, y Estados Unidos, donde la producción sigue creciendo significativamente¹.

De esta gran cantidad de productos de origen polimérico, la producción mundial anual de los productos derivados de poliuretano (PU), se estima en aproximadamente 13,6 millones de toneladas, lo que corresponde a un valor de mercado cercano a 44.000 millones de dólares. Este material representa una fracción menor del mercado, pero su importancia radica en su versatilidad y amplio uso en sectores clave como la industria automotriz², que es uno de los mayores consumidores debido a las propiedades del poliuretano que permiten fabricar componentes ligeros, duraderos y eficientes.

Se puede entender la dimensión y generación de este tipo de residuos presentando los datos que las empresas del sector proporcionan: la cantidad de residuo generada en una sola fábrica de poliuretano para refrigeración o de poliuretano para techos de vehículos con un volumen de negocio medio, ronda los 100 kg al día por fábrica. Y esto sin contar con los residuos post fabricación de derivados de poliuretano contaminados con otros productos (techos de vehículos completos, interior de paneles o asientos completos, por ejemplo).

La UE tiene la intención de aumentar la reutilización y reciclaje de estos productos plásticos progresivamente con el fin de lograr una economía sostenible.

El Libro Verde sobre la política integrada de productos, presentado por la Comisión Europea, propone la estrategia de implicar a todas las partes

¹Plastics Europe. "Plastics - the facts 2023" from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2023/>

²European Commission. "Plastics" from https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en

interesadas en todos los ámbitos políticos posibles a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos³. Con este fin, establece una estrategia de prevención y reciclado de residuos, proporcionando directrices y describiendo los medios para mejorar la gestión de residuos. Su objetivo es reducir los impactos ambientales negativos de los residuos a lo largo de su ciclo de vida, para tenerlos en cuenta como un recurso potencial a utilizar. De esta forma, se promueve su reutilización, reciclaje y recuperación. Todo ello en base al impacto ambiental y al ciclo de vida de los recursos⁴.

Por otra parte, la industria del poliuretano es consciente de su propia responsabilidad. El sector del poliuretano involucra sólo en Europa a 18.000 personas y mueve una cifra de negocios de unos 4.000 millones de euros. A nivel mundial engloba 240.000 empresas, con un millón de puestos de trabajo y generando una economía por valor de 207 billones de euros.

El uso masivo de polímeros y plásticos también genera importantes problemas ambientales, como la contaminación visual, la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, se han desarrollado diversas estrategias para reducir el impacto ambiental global.

Para reducir este impacto, existen diferentes opciones de reciclaje y recuperación para el de poliuretano y sus derivados, que se pueden clasificar en:

- Mecánico: es el proceso que implica la recuperación de materiales mediante la aplicación de fuerzas físicas para transformar y reutilizar productos al final de su vida útil. Es la opción que se desarrolla en esta Tesis.
- Químico: implica romper las cadenas moleculares del poliuretano para recuperar sus componentes básicos.
- Energético: consiste en incinerar los residuos de poliuretano para aprovechar su poder calorífico y generar electricidad o vapor.

Igualmente, el sector de la construcción desempeña un papel importante en la economía. Genera casi el 10% del PIB y proporciona 20 millones de empleos en Europa, principalmente en micro y pequeñas empresas. Asimismo, los materiales empleados en edificación y obra civil representan el 42% de nuestro

³EUR-Lex. "Integrated product policy" from <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/integrated-product-policy.html>

⁴EUR-Lex. "Strategy on the prevention and recycling of waste" from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=uriserv:l28168>

consumo final de energía, aproximadamente el 35% de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero y más del 50% de todos los materiales extraídos.

Partiendo de esta premisa, el objetivo global de esta investigación se concreta en la utilización de los residuos generados en la industria del automóvil (sector productivo de especial relevancia e implantación en la Comunidad Autónoma de Castilla y León y Provincia de Burgos) “valorizados como materia prima con valor añadido”⁵ para su incorporación a la industria del prefabricado del Sector de la Construcción, menos tecnificada y consumidora de una ingente cantidad de recursos naturales (áridos, cemento, energía, agua, emisiones de CO₂, etc.)

La dilatada experiencia previa de la Unidad de Investigación Consolidada en la que se incluye esta investigación lleva a pensar que estos materiales serán capaces de reducir la cantidad de árido seco utilizado entre un 25% y hasta un 100%, reemplazándolo con polímero triturado o sus derivados. La ventaja del empleo de residuos de espuma de poliuretano es que es potencialmente mucho más flexible e hidrófobo que otros materiales ligeros tradicionales, como perlita, vidrio expandido o microesferas huecas, y puede ser útil para controlar las tasas de absorción de agua posterior y, por tanto, también la durabilidad.

Este trabajo se justifica por la necesidad de encontrar una viabilidad técnica a la ingente cantidad de este tipo de residuos industriales, que sólo en empresas de la ciudad se estima en alrededor de 1 tonelada/día de residuo de poliuretano, y una alternativa a su depósito en vertederos que no se base en una simple valorización energética.

Las características y naturaleza propias de los materiales de construcción, especialmente en base cemento, hace posible valorizar incluso poliuretano que provenga de paneles aislantes de este polímero, con restos de otros materiales (adhesivos, óxidos metálicos, restos de pintura y/o enlucidos, etc.) con lo que el reaprovechamiento del material no se ve dificultado al tiempo que se evita su envío a vertedero.

1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente Tesis Doctoral se articula en trece capítulos y un anexo, tal y como se resume a continuación:

⁵Junta de Castilla y León. "Plan Sectorial del Hábitat de Castilla y León 2021" from https://transparencia.jcyl.es/participacion/Participaci%C3%B3n%20Econom%C3%ADa%20y%20Hacienda/Plan_Sectorial_Habitat.pdf

- **Capítulo 01 - Introducción:** en el primer capítulo se presenta el contexto y la justificación de la investigación, y se define la estructura de la Tesis Doctoral.
- **Capítulo 02 - Estado del arte:** este apartado revisa los estudios previos sobre el reciclaje y la recuperación de los residuos de poliuretano, así como las propiedades y aplicaciones de los materiales de construcción en base cemento con adición de estos residuos.
- **Capítulo 03 - Objetivos:** se definen los objetivos generales y específicos de la investigación, que se centran en la valorización de los residuos de polímero procedentes de la industria del automóvil, para su incorporación a la industria del prefabricado del sector de la construcción.
- **Capítulo 04 - Experimental:** el cuarto capítulo describe los procedimientos experimentales empleados para la caracterización de los adoquines y bloques, que son los productos prefabricados fabricados con residuos de poliuretano. Se detallan los métodos para evaluar el aspecto visual, la resistencia estructural, la permeabilidad, la resistencia al desgaste y otras propiedades físicas, mecánicas y térmicas.
- **Capítulo 05 - Caracterización de materias primas:** en esta sección se caracterizan las materias primas empleadas en la fabricación de los adoquines y bloques, como el cemento, el árido, el residuo de polímero, el agua y los aditivos. Se analizan las propiedades físicas, químicas y granulométricas de estos materiales.
- **Capítulo 06 - Adoquines de cemento aligerados con residuos industriales de poliuretano:** se presenta el proceso de elaboración, la dosificación y la caracterización de los adoquines, que son prefabricados de hormigón con sustitución parcial o total del árido por residuos de poliuretano. Entre otros aspectos, se determina la durabilidad, así como su comportamiento frente al fuego, propiedades hídricas y la abrasión.
- **Capítulo 07 - Bloques de cemento aligerados con residuos industriales de poliuretano:** se describe la fabricación y la caracterización de los bloques, que son prefabricados de mortero con sustitución parcial o total del árido por residuo. Se analizan los efectos de los diferentes aditivos y porcentajes de sustitución en las propiedades físicas y mecánicas de los bloques, así como su permeabilidad y absorción de agua.

- **Capítulo 08 - Análisis del ciclo de vida:** este capítulo realiza un análisis del ciclo de vida (ACV) de los adoquines y bloques, comparándolos con los productos convencionales, para evaluar su impacto ambiental en términos de consumo de recursos, emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos y potencial de reciclaje. Se concluye que los prefabricados con residuos de PU presentan una menor huella ecológica que los productos tradicionales.
- **Capítulo 09 - Puesta en obra; demostrador:** se explica el proceso de instalación de los adoquines y bloques en una obra real, como parte de un proyecto de demostración. Se describen las condiciones de colocación, las características del pavimento y el muro, y las ventajas de los prefabricados con residuos de PU en términos de funcionalidad, estética y sostenibilidad.
- **Capítulo 10 – Prueba Piloto:** en este capítulo se describe la implementación de una prueba piloto para evaluar la viabilidad y el rendimiento de los adoquines y bloques de cemento aligerados con residuos industriales de poliuretano. Se detallan los procedimientos y las condiciones de la prueba, así como los resultados obtenidos en términos de durabilidad, resistencia y funcionalidad de los materiales utilizados.
- **Capítulo 11 - Conclusiones finales:** Este capítulo resume las principales conclusiones de la investigación, destacando los logros obtenidos en la valorización de los residuos de PU, la mejora de las propiedades de los materiales de construcción, la reducción del impacto ambiental, y la viabilidad técnica y económica de los adoquines y bloques.
- **Capítulo 12 - Futuras líneas de investigación:** Este capítulo propone algunas ideas para continuar y ampliar la investigación realizada, como la optimización de las dosificaciones y los aditivos, el estudio de otras propiedades y ensayos de los prefabricados, la búsqueda de nuevas fuentes y aplicaciones de los residuos de PU, y la realización de más proyectos de demostración y difusión.
- **Capítulo 13 - Referencias bibliográficas:** listado por orden alfabético de todas las referencias bibliográficas citadas a pie de página.
- **Anexo** - se recopila la documentación gráfica del seguimiento realizado con la evolución del demostrador a lo largo de todo un año.

Capítulo

02

Estado del arte

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan los estudios de otros investigadores que se relacionan con la propuesta de este trabajo y que son de particular interés por sus progresos en el tema. Se han hallado varias referencias a trabajos científicos donde se añaden y modifican las dosificaciones de las diferentes materias primas que forman los morteros de cemento, para intentar mejorar o alterar alguna de sus propiedades, tanto físicas como mecánicas, y conseguir así nuevos materiales de construcción con propiedades mejoradas.

Por otro lado, se examinan las investigaciones sobre el uso de estas u otras mezclas como materia prima para la fabricación de prefabricados, lo que supone un nuevo campo de trabajo, en el que se encuadra el estudio realizado en esta Tesis Doctoral.^{6, 7}

2.1 ECONOMÍA CIRCULAR

Durante los últimos años se ha realizado un consumo excesivo de recursos de forma irresponsable y poco eficiente, lo que nos conduce a un déficit de estos, y al desequilibrio en el intercambio de recursos entre economía y medio ambiente. Motivado por ello, la economía circular surge como un enfoque novedoso para emplear los recursos de forma más ética y racional, y así ayudar a prolongar la vida de los recursos dentro del ciclo de producción y consumo.^{8,9} Es por esto por lo que la economía circular se plantea como una solución para lograr el desarrollo sostenible,¹⁰ al aportar soluciones al problema de los residuos y al generar nuevos productos a partir de desechos con valor económico.¹¹

⁶Simonet, C. (2009). Hormigón: historia de un material: economía, técnica, arquitectura, Editorial Nerea.

⁷European Commission. "Circular economy action plan" from https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

⁸Upadhyay, S., Alqassimi, O., Khashadourian, E., Sherm, A., & Prajapati, D. (2024). Development in the Circular Economy Concept: Systematic Review in Context of an Umbrella Framework. Sustainability, 16(4), 1500.

⁹Mukherjee, P. K., Das, B., Bhardwaj, P. K., Tampha, S., Singh, H. K., Chanu, L. D., ... & Devi, S. I. (2023). Socio-economic sustainability with circular economy—an alternative approach. Science of The Total Environment, 166630.

¹⁰Ferraz, D., & Pyka, A. (2023). Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review. Environmental Science and Pollution Research, 1-22.

¹¹Sutomo, B., Mukhlis, M., & Ahadiat, A. (2023). A Circular Economy, Waste Management, and Sustainable Development: A Case Study of a Transmigration Rural Area on the Indonesian Island of Sumatra. Quality-Access to Success, 24(192).

En el sector de la construcción, la aplicación de la economía circular tiene como objetivo reutilizar los recursos y maximizar, por ende, el aprovechamiento de estos.¹² Se busca que los recursos aporten el máximo valor, es decir, que se mantengan en el proceso durante el mayor tiempo posible. Para ello, es importante definir los principios operativos que enlazan los objetivos de economía circular dentro de la economía sostenible, a través de estrategias prácticas de implementación.¹³

La reutilización y la disminución de la generación de residuos se tornan básicas en una sociedad que consume recursos a una velocidad superior de la que los produce el planeta.¹⁴ Esta generación de desechos supuso en 2016 a nivel mundial 0,74 kg/día/cápita de residuos, y se estima esta cantidad de desechos globales aumente a 3.400 millones de toneladas para 2050.¹⁵ Debido a esto, la tendencia actual de desarrollo es hacia una producción sostenible y más limpia mediante el empleo de conocimientos transversales que, a través del empleo de la investigación, se aumente la circularidad de la energía y los materiales, así como la contribución de la eco innovación, el consumo más limpio y la gestión de estos residuos.¹⁶

En este sentido, la Unión Europea señala el sector de la construcción como uno de los ejes en torno a los que debe girar el “Plan de acción de la economía circular de la UE”. Todo ello bajo un marco ambicioso con la pretensión de que la Unión Europea se convierta en referente y líder de la transición hacia esta economía circular.¹⁷ Por todo ello, está desarrollando en la actualidad numerosas líneas de investigación, tratando de analizar criterios, metodologías, políticas,

¹² Ortiz-de-Montellano, C. G. S., Samani, P., & van der Meer, Y. (2023). How can the circular economy support the advancement of the Sustainable Development Goals (SDGs)? A comprehensive analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 352-362.

¹³ Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G., & Soto-Oñate, D. (2019). Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. *Journal of cleaner production*, 214, 952-961.

¹⁴ Savini, F. (2023). Futures of the social metabolism: Degrowth, circular economy and the value of waste. *Futures*, 150, 103180.

¹⁵ Chandrappa, R., & Das, D. B. (2024). Waste quantities and characteristics. In *Solid Waste Management: Principles and Practice* (pp. 47-87). Cham: Springer International Publishing.

¹⁶ Giannetti, B. F., Lopez, F. J. D., Liu, G., Agostinho, F., Sevegnani, F., & Almeida, C. M. (2023). A resilient and sustainable world: Contributions from cleaner production, circular economy, eco-innovation, responsible consumption, and cleaner waste systems. *Journal of cleaner production*, 384, 135465.

¹⁷ S&P. “La economía circular en la construcción” from <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/economia-circular-construccion/>

implementaciones y resultados sobre la gestión de residuos, para así mejorar las estrategias de dichas gestiones.¹⁸

Dentro de estas políticas de desarrollo de la Unión Europea, se potencian numerosos proyectos dirigidos a este fin. La Universidad de Burgos es pionera en la captación de fondos dentro de programas que contribuyen a optimizar procesos y productos industriales.

Bajo este marco, algunos casos muy exitosos de transferencia del conocimiento, son por ejemplo, el proyecto europeo ECO-BINDER,^{19,20} que tiene el objetivo de crear hormigones más sostenibles y menos contaminantes a través de la creación de ligantes ecológicos a partir de materiales reciclados o el proyecto BIOSYSMO,^{21,22} que busca desarrollar sistemas de biorremediación que exploten sinergias para mejorar la eliminación de contaminantes mixtos, optimizando procesos para la descontaminación de suelos y aguas.

El proyecto *CO2 absorbing Materials Project- RISE*, CO2MPRISE,²³ tenía como misión desarrollar nuevas tecnologías en el campo de la captura y conversión de CO₂, estudiando materiales basados en olivino para convertir dióxido de carbono en metano, así como reducir fotoquímicamente el CO₂ por radiación solar.

Otro proyecto europeo reciente (inicio enero 2024) ZERO-CO2 CONTRABASS^{24,25} coordinado por la Universidad el País Vasco, pretende reducir las emisiones de CO₂ en la fabricación del cemento, investigando los procesos fisicoquímicos fundamentales que rigen la carbonatación de las fases del clínker y la pasta de cemento, así como la posterior formación de cementos de carbonato de calcio.

Dentro de la Comisión Europea hay varios proyectos orientados a la temática de esta investigación como, por ejemplo, el proyecto *Ecological Low Impact*

¹⁸Chioatto, E., & Sospiro, P. (2023). Transition from waste management to circular economy: the European Union roadmap. *Environment, Development and Sustainability*, 25(1), 249-276.

¹⁹ European Commission: Development of insulating concrete systems based on novel low CO₂ binders for a new family of eco-innovative, durable, and standardized energy efficient envelope components. (ECO-Binder) <https://cordis.europa.eu/project/id/637138>

²⁰ ECO-Binder Project. Facebook, <https://www.facebook.com/ecobinder.eu/>

²¹ European Commission: BIOremediation systems exploiting Synergies for improved removal of Mixed Pollutants (BIOSYSMO) <https://cordis.europa.eu/project/id/101060211>

²² BioSysmo from <https://www.biosysmo.eu/>

²³ European Commission: CO₂ absorbing Materials Project-RISE (CO2MPRISE) <https://cordis.europa.eu/project/id/734873>

²⁴ European Commission: zero-CO₂ Cement Through Carbonation of Calcium Silicates and aluminates (CONTRABASS) <https://cordis.europa.eu/project/id/101119715>

²⁵ CONTRABASS MSCA. (s.f.). *Zero-CO₂ Cement Through Carbonation of Calcium Silicates and aluminates*. From <https://www.contrabass-msca.eu/>

Production Sport Elastomer, ECLIPSE,^{26,27} que desarrolla tecnologías avanzadas para la valorización de plásticos complejos, fomentando su reintegración en cadenas de valor industriales y reduciendo el desperdicio.

Por otro lado, el proyecto *Advance and sustainable recycling processes and value chains for plastic-based multi-materials*, MultiCycle,^{28,29} ha implementado una planta piloto que facilita el reciclaje de materiales compuestos de difícil manejo, disminuyendo la dependencia de materias primas vírgenes y contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental.

Asimismo, *Second generation Methyl MethAcrylate*, MMAtwo^{30,31} se enfoca en la recuperación de polimetacrilato de metilo (PMMA), un plástico de alto valor, transformándolo en recursos reutilizables de alta calidad. El proyecto *Policies and Research for an Integrated Management of Urban Sustainability*, PRIMUS,³² que busca integrar tecnologías de reciclaje en un modelo circular a través de un enfoque interdisciplinario o el proyecto *A developed thermochemical approach for catalytic depolymerization of plastics* CATALEPTIC³³ que explora innovaciones termoquímicas para convertir poliolefinas en materias primas recicladas y combustibles alternativos. En conjunto, estos proyectos y otros muchos impulsados por Europa para el avance en el desarrollo de soluciones ecoeficientes mejoran la eficiencia energética y contribuyen significativamente a la descarbonización global.

²⁶ European Commission: Ecological Low Impact Production Sport Elastomer (ECLIPSE) <https://cordis.europa.eu/project/id/735976/reporting>

²⁷ Técnicas Reunidas. "Proyecto ECLIPSE: Investigación de Nuevas Tecnologías de Reciclado y Valorización de Residuos Plásticos Complejos." from <https://project-eclipse.eu/>

²⁸ European Commission: Advanced and sustainable recycling processes and value chains for plastic-based multi-materials (Multicycle) <https://cordis.europa.eu/project/id/820695>

²⁹ Multicycle from <https://multicycle-project.eu/>

³⁰ European Commission: Second generation Methyl Methacrylate (MMAtwo) <https://cordis.europa.eu/project/id/820687>

³¹ MMAtwo from <https://www.mmatwo.eu/>

³² European Commission: Policies and Research for an Integrated Management of Urban Sustainability (PRIMUS) <https://cordis.europa.eu/project/id/226814>

³³ European Commission: A developed thermochemical approach for catalytic depolymerization of plastics (CATALEPTIC) <https://cordis.europa.eu/project/id/101033386>

Centrándonos en el reciclaje de los residuos de espumas de poliuretano aplicado al sector de la construcción, encontramos un estudio que consiste en su uso potencial en matrices de yeso³⁴ dentro del proyecto LIFE-REPOLYUSE.^{35,36}

Dicho proyecto aborda la fabricación de placas de yeso con poliuretano mediante el uso de técnicas novedosas para su reutilización. En este estudio se han caracterizado y definido los parámetros de procesamiento de siete residuos de espuma de poliuretano de diversos formatos y procedencia y se han realizado ensayos de caracterización de muestras en estado fresco y endurecido con diferentes granulometrías y sustituciones, hasta encontrar la mezcla óptima para la fabricación a escala real del prototipo. Actualmente, se encuentra en fase piloto en tres edificios de diferente tipología (uno de obra nueva y dos rehabilitaciones) con el objetivo de realizar una monitorización, comparando con placas de escayola convencionales. La superficie de monitorización es de 200 m² en el Parque Tecnológico de Araba (Miñano) en Álava (España), de 350 m² en el Demo-site de la Escuela Politécnica Superior en Burgos (España) y de 400 m² en el Edificio Sir John Laing en la Universidad de Coventry (Reino Unido).

Otro caso en el que se propone el reciclado de este tipo de residuos es el proyecto POLYMIX³⁷ que estudió su aplicación en mezclas asfálticas. Esta solución buscaba no solo aportar ventajas medioambientales, sino también aumentar el valor añadido del producto. Con el objetivo de demostrar la viabilidad técnica de la tecnología, se implementaron las 4 mezclas POLYMIX en una carretera real y se llevó a cabo la monitorización de dichos tramos durante 18 meses. Durante esta monitorización, se determinó la evolución de la macro textura, la resistencia al deslizamiento y la regularidad. Además, se extrajeron testigos cilíndricos de la capa de rodadura para determinar el contenido de betún, polímero y áridos, junto con la capacidad estructural de la carretera. Igualmente, se realizaron controles visuales para detectar daños en la superficie del pavimento consecuencia de las cargas del tráfico y del clima. El principal resultado obtenido durante la monitorización del tramo experimental fue la confirmación, de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio, de la mayor resistencia de las mezclas POLYMIX a la formación de roderas. Adicionalmente, se evaluó el potencial impacto ambiental de esta tecnología mediante un análisis de ciclo de vida demostrando que el reciclaje y uso de

³⁴ DICYT "El poliuretano encuentra una segunda vida útil como material de construcción" from <https://www.dicyt.com/viewNews.php?newsId=40319>

³⁵ European Commission: Recovery of Polyurethane for Reuse in eco-efficient materials. (LIFE REPOLYUSE) <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE16-ENV-ES-000254/recovery-of-polyurethane-for-reuse-in-eco-efficient-materials>

³⁶ Life REPOLYUSE from <https://life-repolyuse.com/>

³⁷ Proyecto Polymix from <https://www.giteco.unican.es/proyectos/POLYMIX/Principal.html>

residuos poliméricos en mezclas bituminosas no solo no aumenta el impacto ambiental del producto final, sino que incluso lo reduce en algunos casos.

2.2 RESIDUOS POLIMERICOS

Los polímeros son productos sintéticos empleados en la industria ya que son económicos, duraderos, moldeables y tienen una amplia gama de aplicaciones.³⁸ Estas propiedades hacen que tengan una elevada demanda, cuyo resultado es una inmensa generación de desechos, suponiendo todo un desafío.³⁹ La acumulación de estos residuos plásticos a lo largo de los años, así como la falta de técnicas de eliminación adecuadas, han dado lugar a una situación sin precedentes en la que los residuos plásticos están contaminando todos los recursos naturales de nuestro medio ambiente.^{40,41} La longevidad, que es una de las características más beneficiosas del plástico, también es un factor perjudicial para su eliminación segura.⁴² Según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, cada año se generan alrededor de 300 millones de toneladas de residuos plásticos en todo el mundo, mientras que los residuos plásticos que se reciclan apenas representan el 9%.

Diversos proyectos europeos antes mencionados han dado lugar a publicaciones científicas clave en la gestión de residuos poliméricos y la economía circular. El artículo "Designing sustainable concrete mixes with potentially alternative binder systems: Multicriteria decision making process" que aborda la creación de mezclas de hormigón más sostenibles mediante el uso de aglutinantes alternativos.⁴³

Por su parte, "Life-Repolyuse from the Laboratory to a Commercial Product as Part of the Circular Economy: The Entrepreneurial Approach", del proyecto

³⁸Jambeck, J. R., & Walker-Franklin, I. (2023). The impacts of plastics' life cycle. *One Earth*, 6(6), 600-606.

³⁹Mong, G. R., Tan, H., Sheng, D. D. C. V., Kek, H. Y., Nyakuma, B. B., Woon, K. S., ... & Wong, K. Y. (2023). A review on plastic waste valorisation to advanced materials: Solutions and technologies to curb plastic waste pollution. *Journal of Cleaner Production*, 140180.

⁴⁰Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic waste: challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management. *International Journal of Environmental Research*, 17(1), 20.

⁴¹Pandey, P., Dhiman, M., Kansal, A., & Subudhi, S. P. (2023). Plastic waste management for sustainable environment: techniques and approaches. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5(2), 205-222.

⁴²Dey, S., Veerendra, G. T. N., Babu, P. A., Manoj, A. P., & Nagarjuna, K. (2024). Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review. *Biomedical Materials & Devices*, 2(1), 70-112.

⁴³ Hossain, M. U., Liu, J.-C., Xuan, D., Ng, S. T., Ye, H., & Abdulla, S. J. (2022). Designing sustainable concrete mixes with potentially alternative binder systems: Multicriteria decision making process. *Journal of Building Engineering*, 45, 103587. doi: 10.1016/j.job.2021.103587

REPOLYUSE, aborda la transformación de residuos de poliuretano en productos comerciales, destacando el enfoque emprendedor en la economía circular.^{44,45,46}

Desde BIOSYSMO, el estudio "Development of a New ECO-Friendly Binder for Textile Industry"⁴⁷ presenta un aglutinante ecológico basado en biopolímeros para la industria textil, mejorando la sostenibilidad del sector. En el marco de MultiCycle, el artículo "Evaluation of Mineral Eco-Binders from Secondary Raw Materials: Environmental Assessments"⁴⁸ examina la viabilidad ambiental de eco-aglutinantes minerales derivados de materiales secundarios. Finalmente, el proyecto Polymix contribuyó con "Evaluation of Bio-Materials' Rejuvenating Effect on Binders for High-Reclaimed Asphalt Content Mixtures,"⁴⁹ que investiga cómo los biomateriales mejoran las propiedades de aglutinantes utilizados en mezclas de asfalto reciclado. Estas investigaciones reflejan avances en la sostenibilidad y la valorización de residuos poliméricos.

Otros autores caracterizan mecánicamente morteros de yeso elaborados con residuos del sector de la automoción, se trata de residuos mixtos que contienen además de poliuretano, cartón y fibra de vidrio.⁵⁰ Por otro lado, otras investigaciones han explorado la incorporación de residuos de poliestireno expandido y cenizas de lodos de papel a morteros de cemento, con el objetivo de desarrollar morteros más ligeros que presenten buenas propiedades de aislamiento térmico.⁵¹ Asimismo, se han estudiado mezclas que combinan

⁴⁴ Gómez-Rojo, R., Alameda, L., Rodríguez, A., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2019). Characterization of polyurethane foam waste for reuse in eco-efficient building materials. *Polymers*, 11(2). doi: 10.3390/POLYM11020359

⁴⁵ Alameda-Cuenca-Romero, L., Arroyo, R., Alonso, Á., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2022). Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes. *Journal of Building Engineering*, 50. doi: 10.1016/j.job.2022.104075

⁴⁶ Rodrigo-Bravo, A., Alameda Cuenca-Romero, L., Calderón, V., Rodríguez, Á., & Gutiérrez-González, S. (2022). Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile. *Energy and Buildings*, 259. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111867

⁴⁷ Mezheri, A., Benzarti, M., Ivanov, D., & Lallam, A. (2024, 2024/). *Development of a New ECO-Friendly Binder for Textile Industry*. Paper presented at the Proceedings of the 10th International Conference of Applied Research on Textile and Materials, Cham.

⁴⁸ Bouzar, B., Benzerzour, M., & Abriak, N.-E. (2024). Evaluation of mineral eco-binders from secondary raw materials: environmental assessments. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(4), 2546-2566. doi: 10.1007/s10163-024-01995-7

⁴⁹ Jimenez del Barco-Carrion, A., Perez Martinez, M., Themeli, A., Lo Presti, D., Marsac, P., Pouget, S., Airey, G. D. (2017). Evaluation of biomaterials' rejuvenating effect on binders for high-reclaimed asphalt content mixtures. *Materiales de Construcción*, 67(327). doi: 10.3989/mc.2017.04516

⁵⁰ Asadi Ardebili, A., Villoria Sáez, P., González Cortina, M., Tasán Cruz, D. M., Rodríguez Sáiz, Á., & Atanes-Sánchez, E. (2023). Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. *Construction and Building Materials*, 370. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130675

⁵¹ Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., & Cheeseman, C. R. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285-292. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028

residuos de polvo de poliuretano y arenas de escape de fundición.⁵² Finalmente, la incorporación de residuos de poliestireno expandido a morteros de yeso ha sido objeto de análisis en otros trabajos,⁵³ con el propósito de mejorar las propiedades funcionales de estos materiales.

En los últimos años, la producción de plástico se ha multiplicado y también lo hacen los residuos plásticos. La Figura 2.1 muestra la producción mundial de plástico en el pasado reciente, y la Figura 2.2 muestra el escenario de la gestión de residuos plásticos.⁵⁴

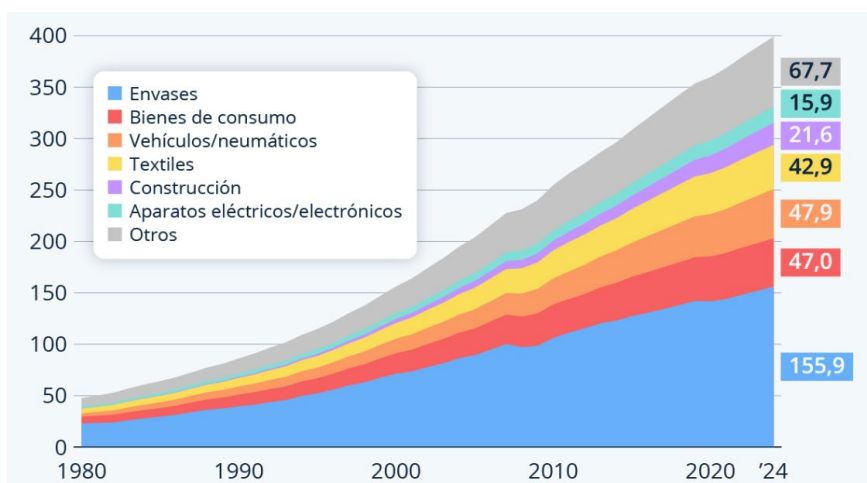


Figura 2.1 Producción mundial de plástico⁵⁵

Son numerosas las propiedades beneficiosas de los plásticos como la durabilidad, la ligereza, la resistencia química y al agua, el aislamiento térmico y eléctrico o la flexibilidad.

⁵² Da Silva, L. R. R., Francisco, M. B., Martins, R. M., Gonçalves, P. C., Dos Santos, V. C., Gomes, G. F., & Melo, M. D. L. N. M. (2023). RSM-Based Modeling and Optimization of Cementitious Composites with Polyurethane Powder Waste and Foundry Exhaust Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(3). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004627

⁵³ San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.040

⁵⁴Springer Link "Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review" from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16980-y?fromPaywallRec=true>

⁵⁵Statista (2024). El mundo está inundado de residuos plásticos <https://es.statista.com/grafico/30051/produccion-mundial-de-residuos-plasticos-por-tipo/>

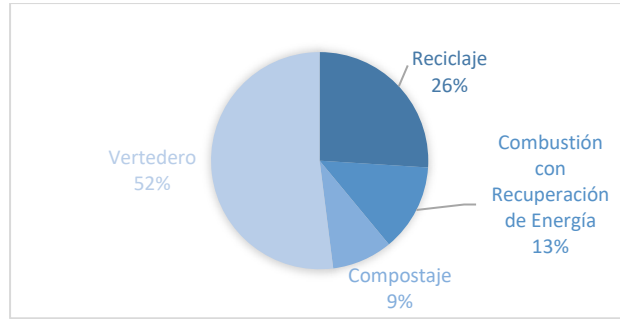


Figura 2.2 Gestión de residuos plásticos

Si nos centramos en polímeros de base poliuretano,⁵⁶ las propiedades que los hacen útiles en aplicaciones de construcción son:

- Excelente adhesión
- Buena resistencia a la tracción
- Flexibilidad
- Dureza
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia al aceite y a los disolventes
- Resistencia a la luz ultravioleta y al ozono.

Las diversas tecnologías que ya se ofrecen a la industria de la construcción son revestimientos protectores, selladores, pisos, impermeabilizantes, adhesivos, espumas aislantes y selladores de fugas o sistemas de inyección de grietas. La Tabla 2.1 describe las características generales del poliuretano y la Tabla 2.2 resume las principales propiedades, productos y áreas de aplicación.

PROPIEDAD	VALOR
Rango de dureza (shore A)	10-100
Resistencia a la tracción (MPa)	Hasta 70
Deformación por tracción en la rotura (%)	500-1000
Temperatura de servicio (°C)	-20 a 80
Resistencia al calor	Moderado a excelente
Resistencia al frío	Moderado
Resistencia mecánica	Excelente
Resistencia a la abrasión	Muy bueno
Resistencia a la luz solar	Excelente
Resistencia al ozono	Muy bueno
Resistencia al fuego	Medio
Resistencia química	Excelente

Tabla 2.1 Características generales del poliuretano.

⁵⁶Springer Link "Polyurethanes in the construction industry" from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-4954-9_4

PRODUCTOS/ÁREAS	PROPIEDADES
Selladores para juntas de construcción	retención de la capacidad de movimiento
	alta resistencia al desgarro
	buena recuperación
	resistencia a la intemperie
	gama de colores
Recubrimientos, para protección de hormigón y metales	protección del hormigón contra sales descongelaentes y otros productos químicos
	capacidad de controlar la absorción de agua
	adhesión
	adecuado para aplicaciones interiores y exteriores
	retención a largo plazo del color y el brillo
Adhesivos para unir componentes de viviendas	flexibilidad
	excelente unión
Sistemas de impermeabilización, para una amplia gama de aplicaciones de impermeabilización	diferentes grados de flexibilidad
	curado rápido
	estabilidad térmica
	sin costura
	resistencia química
	estable a la oxidación
Sistemas de sellado de fugas o inyección de grietas, para grietas donde se anticipa movimiento	excelente unión
	impermeable al agua
	elástico
	flexible
Espumas para aislamiento en edificios	adecuado para su aplicación en condiciones secas y húmedas
	baja conductividad térmica
	baja densidad baja permeabilidad a la humedad
	excelente estabilidad dimensional

Tabla 2.2 Principales propiedades, productos y áreas de aplicación de los poliuretanos.

Uno de los grandes problemas que presenta el poliuretano es su difícil reciclaje, limitándose éste a la incineración o acumulación en vertederos principalmente.⁵⁷ En torno al 12% de los residuos plásticos se gestiona mediante incineración, un proceso que reduce el volumen de desechos hasta aproximadamente un 1%, obteniendo en el proceso energía térmica. No obstante, la producción de gases de efecto invernadero y el hecho de que se encontraran residuos de micro plásticos en las cenizas por un proceso de incineración incompleto,⁵⁸ y que por tanto pueden continuar en el ecosistema,

⁵⁷“DEGRADACIÓN DE POLIURETANO Y APLICACIONES BIOTECNOLÓGICAS” from <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/143623/DIAZ%20PANE%2c%20FRANCISCO%20JOSE.pdf?sequence=1>

⁵⁸Jiao, H., Ali, S. S., Alsharbaty, M. H. M., Elsamahy, T., Abdelkarim, E., Schagerl, M., ... & Sun, J. (2024). A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: Challenges, research gaps, and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 271, 115942.

hace que se continúe en la búsqueda de alternativas más sostenibles, como puede apreciarse en la Figura 2.3

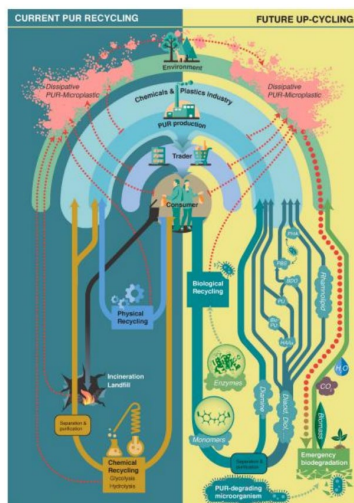


Figura 2.3 Esquema comparativo de las vías de desecho y reciclaje de poliuretano en la actualidad y lo estimado en los próximos años.

Además de estudios en los que se sustituye el yeso en la elaboración de morteros de yeso ligeros,^{59,60} existen otras investigaciones que plantean la sustitución de parte del árido natural presente en los morteros de cemento para incorporar a las mezclas residuos de poliuretano.^{61,62}

2.3 ADOQUINES

El adoquín ecológico, también conocido como adoquín, es una pieza sólida que se utiliza fundamentalmente en la construcción de pavimentos, con una diferencia clara con respecto al adoquín tradicional que es la de estar fabricado

⁵⁹ Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653-658. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055

⁶⁰ Santamaría-Vicario, I., Alameda-Cuenca-Romero, L., Gutiérrez-González, S., Calderón-Carpintero, V., & Rodríguez-Saiz, A. (2020). Design and characterization of gypsum mortars dosed with polyurethane foam waste PFW. *Materials*, 13(7). doi: <https://doi.org/10.3390/ma13071497>

⁶¹ Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 672-677. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017

⁶² Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2012). Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1174-1179. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.006

con materiales o utilizando técnicas que permiten reducir el impacto en el suelo y favorecer los procesos naturales.⁶³

Es importante tener en cuenta que en el mercado existen diferentes tipos de adoquines ecológicos, y aunque el cometido es el mismo para todos ellos, las particularidades y características difieren entre unos y otros.

Por ejemplo, hay adoquines ecológicos que están diseñados para que un porcentaje de la superficie del suelo esté compuesto por materiales naturales como la tierra, el césped y otras plantas, una solución utilizada en jardines y entornos en los que se quiere dar una especial relevancia al color verde.

Por otra parte, podemos encontrar otro tipo de adoquín como son los adoquines ecológicos fotocatalítico.⁶⁴ Varios estudios han demostrado que el uso de adoquines fotocatalíticos ayudan a reducir entre un 70 y un 90 % la concentración de ciertos gases perjudiciales en el aire.⁶⁵ Lo que impide de paso su adherencia a las fachadas históricas, además de dotarlos de ciertas cualidades muy interesantes. Lo que se consigue con los adoquines de hormigón fotocatalítico, gracias a la presencia de un fotocatalizador como el dióxido de titanio (TiO₂) en él, es acelerar ese proceso de degradación de las sustancias contaminantes en presencia de ciertas longitudes de onda de la luz solar. También se han estudiado las capacidades mecánicas de este tipo de adoquines para las que se han obtenido unos valores de resistencia del material muy similares con respecto a los convencionales, si no idénticos. Incluso se han observado algunas mejoras con respecto a los de hormigón sin la adición de cristales de dióxido de titanio. Como es una mayor resistencia a la segregación de la pasta de cemento que lo compone y un mejor relleno entre los granos de este.

En el caso de los adoquines de caucho reciclado son una excelente alternativa para pavimentar espacios al aire libre de manera duradera y respetuosa con el medio ambiente.⁶⁶ Estos adoquines se fabrican a partir de la trituración de llantas vehiculares en desuso, lo que les brinda propiedades únicas y beneficios tanto para los usuarios como para el entorno.

⁶³Malbila, E., Koungwe, A. G. L., & Toguyeni, D. Y. (2024). Multicriteria analysis of the components of ecological paving stones made from plastic and glass waste, and granular reinforcements. *Open Ceramics*, 18, 100604.

⁶⁴Podawca, K., & Grzymała, A. (2021). Comparative analysis of selected features of traditional and photocatalytic paving stones. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 30.

⁶⁵Prefabricados Jara – “¿Qué son los adoquines de hormigón ecológico con efecto catalítico?” from <https://www.prefabricadosjara.com/adoquines-de-hormigon-ecologico-efecto-fotocatalitico/>

⁶⁶Reciclaje Contemar - “Adoquines de caucho reciclado: duraderos y ecológicos” from <https://www.reciclaiecontemar.es/adoquines-de-caucho-reciclado/>

Hay que destacar su durabilidad superando los estándares de la industria establecidos por las organizaciones ASTM, CSA y europeas. También contribuyen a la reducción del ruido generado por el tráfico, gracias a su capacidad para absorber impactos y vibraciones. Se promueve la economía circular ayudando al medio ambiente al utilizar llantas vehiculares en desuso para su fabricación reduciendo la cantidad de residuos que terminan en los vertederos o en el medio ambiente y gracias a ser duraderos y resistentes, no requieren reemplazos frecuentes, lo que ahorra recursos y reduce la generación de residuos.

Otro ejemplo es el diseño y elaboración de adoquines de PET reciclado,⁶⁷ en los que demostraron, en comparación con los adoquines convencionales elaborados con grava y arena, una mayor resistencia a la compresión. Además, presentan ventajas de uso significativas debido a su capacidad para evitar fracturas o deformaciones considerables, atribuidas a los refuerzos internos. Como resultado, se requieren cargas mayores para lograr su fractura total.

En cambio, esta clase de adoquín presenta su limitación en la temperatura, ya que, tras pruebas de comportamiento a diferentes temperaturas, el rango en el que no presenta cambios en sus propiedades estructurales es entre 4°C y 60°C.

Sus beneficios principales son por tanto su ligereza, fácil instalación y lograr una opción viable para el reciclaje de materiales plásticos convirtiéndolos en un producto funcional.

Otros autores han estudiado la incorporación de residuos plásticos en la fabricación de adoquines con resultados satisfactorios desde el punto de vista de la resistencia mecánica y a nivel de porosidad,⁶⁸ o el empleo de residuos de construcción y demolición (RCD),^{69,70,71} incluso de residuos de perforación que

⁶⁷Ideas en ciencia - "Diseño y elaboración de adoquines de pet reciclado" from http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/66911/REVISTA%20IDEAS_VOL_44_1_DISEN%C3%8C%20O.pdf?sequence=3

⁶⁸ Kihenyegho, S. M., Maombi, M. Y., Kambale, M. V., & Ndambi, Y. T. (2023). *Manufacture of cobblestones from plastic waste, possible solution to environmental problems in developing countries*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.

⁶⁹ Becerra-Rojas, J. S. (2023). Use of construction and demolition waste for the production of paving stones for pedestrian walkways. *DYNA (Colombia)*, 90(229), 121-128. doi: 10.15446/dyna.v90n229.109178

⁷⁰ Mejía-De-Gutiérrez, R., Robayo-Salazar, R., & Valencia-Saavedra, W. (2023). Construction and demolition waste as raw material for concrete and construction elements obtained through alkaline activation. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(184), 505-519. doi: 10.18257/raccefyn.1892

⁷¹ Özalp, F., Yilmaz, H. D., Kara, M., Kaya, Ö., & Şahin, A. (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb, and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17-23. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030

normalmente están impregnados con lodos base agua y base aceite⁷² o residuos de vidrio triturado.⁷³ Así mismo, existen estudios que tratan de incorporar a hormigones residuos procedentes de adoquines.⁷⁴

2.4 BLOQUES DE HORMIGÓN

En el caso de los bloques de hormigón podemos ver que hay diversos casos de uso en el mercado que hemos analizado previo a la investigación.

Un ejemplo que podemos encontrar es el bloque de hormigón desarrollado por una empresa neerlandesa, fabricado con biocemento.⁷⁵ Este producto se inspira en los corales y los ecosistemas marinos y minimizar las emisiones de carbono. El resultado son bloques y baldosas que se curan en 72 horas a temperatura ambiente y, una vez secos, disponen de unas propiedades muy superiores a los fabricados con hormigón tradicional.

Para fabricar las BioBasedTiles se usa un proceso con múltiples patentes, en el que se combinan carbono, calcio y unas bacterias muy concretas. De ahí se obtiene el 15% de biocemento necesario para la mezcla final, a la que se añaden otros ingredientes como los residuos de materiales de la producción del granito, lo que le confiere una resistencia extra a los bloques y baldosas resultantes. Una vez extraídos del molde, los productos resultantes se dejan curar a temperatura ambiente durante 72 horas, unas condiciones muy diferentes a los bloques de hormigón tradicional, que necesitan varios días y el uso de hornos con alta potencia calorífica. Se ha demostrado que son un 20% más ligeras que los bloques de hormigón tradicional y tres veces más resistentes.

En la búsqueda de alternativas al hormigón hay quien busca que el material resultante no sólo no produzca dióxido de carbono, sino que sea capaz de 'secuestrarlo'. Con este fin fue fundada la empresa Partanna, una empresa de materiales de construcción sostenible que presentaba la primera casa construida con ladrillos de hormigón con huella de carbono negativa. En este caso, los

⁷² Gómez, J., Santos, N., & Martínez, R. (2023). Construction of pavers from drilling cuttings as an alternative for environmental management of waste. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 21, 545-550. doi: 10.24084/repqj21.388

⁷³ Olofinnade, O., Ede, A., Ndambuki, J., Omole, D., Jolayemi, K., Oyeyemi, K., . . . Ukoh, A. (2019). *Sustainable utilization of crushed waste glass as sand replacement for production of eco-friendly interlocking paving stones*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

⁷⁴ Bravo-German, A. M., Bravo-Gómez, I. D., Mesa, J. A., & Maury-Ramírez, A. (2021). Mechanical properties of concrete using recycled aggregates obtained from old paving stones. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). doi: 10.3390/su13063044

⁷⁵El Español - "El bloque de hormigón que cambiará la construcción" from https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20240115/bloque-hormigon-cambiar-construccion-ligero-veces-resistente/823417724_0.html

ingredientes principales de la fórmula para sustituir el clásico cemento Portland son salmuera procedente de plantas desaladoras, muy numerosas en un archipiélago como Bahamas, y la escoria, subproducto de la industria metalúrgica. Según sus responsables, la otra gran ventaja de este cemento sostenible es que puede curarse a temperatura ambiente, lo que evita usar más energía para calentar la mezcla. Además, los ingredientes aglutinantes, naturales y reciclados, pueden absorber el CO₂ del aire y 'secuestrarlo' en los ladrillos confeccionados con este material.

Igualmente, hay estudios que investigan la viabilidad de emplear residuos de poliuretano en bloques para muros de carga y soleras,⁷⁶ o residuos de placas de techo de yeso en bloques de hormigón.⁷⁷

Existen investigaciones que tratan de incorporar al mortero de cemento con el que se elaboran bloques prefabricados no solo residuos de poliuretano sino residuos de la industrial siderometalúrgica, como son las escorias negras de horno eléctrico de arco (EAFS).⁷⁸ En otras ocasiones el poliuretano se emplea junto a polvos de vidrio para intentar reducir la absorción de agua y mejorar la dureza de los morteros.⁷⁹

Para elaborar bloques de hormigón se emplean, en otras investigaciones, residuos de botellas de plástico (PET),⁸⁰ residuos agrícolas,⁸¹ desechos de paja de

⁷⁶ Salem, T., Shehadeh, D., Bouchenafa, O., & Florence, C. (2023). Feasibility of using polyurethane waste in the form of granules for civil construction. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(6), 3812-3823. doi: 10.1007/s10163-023-01807-4

⁷⁷ Cuenca-Romero, L. A., Arroyo, R., Alonso, Á., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2022). Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes. *Journal of Building Engineering*, 50. doi: 10.1016/j.job.2022.104075

⁷⁸ Briones-Llorente, R., Barbosa, R., Almeida, M., García, E. A. M., & Saiz, A. R. (2020). Ecological design of new efficient energy-performance construction materials with rigid polyurethane foam waste. *Polymers*, 12(5). doi: 10.3390/POLYM12051048

⁷⁹ Ahmed, S. R., Khedher, M. F., & Al-Zubaidi, A. B. (2020). The mechanical properties of green cement mortar dip-coated with polyurethane polymer. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(2), 239-246.

⁸⁰ Zolfaghari, M. (2024). Energy Saving Evaluation Based on Utilizing Recycled PET Bottles in Concrete Blocks in Iran *EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems II* (pp. 223-239).

⁸¹ Mohammed, S. A., Shakor, P., S. S., Rauniyar, A., Krishnaraj, L., Kumar Singh, A., & Laghi, V. (2023). An environmental sustainability roadmap for partially substituting agricultural waste for sand in cement blocks. *Frontiers in Built Environment*, 9. doi: 10.3389/fbuil.2023.1214788

arroz,⁸² escoria de alto horno,⁸³ residuos de la fabricación de plantillas y suelas como el etileno acetato de vinilo⁸⁴ o polvo de mármol.⁸⁵

2.5 BALDOSAS

La integración de residuos poliméricos en materiales de construcción, como morteros de cemento, hormigones y morteros de yeso, ha sido ampliamente estudiada debido a su capacidad para mejorar propiedades mecánicas, térmicas y de sostenibilidad ambiental. La investigación de Corinaldesi, Mazzoli y Moriconi⁸⁶ que evaluó el comportamiento mecánico y la conductividad térmica de morteros que contienen partículas de caucho reciclado, demostrando mejoras significativas en el aislamiento térmico de las mezclas. De manera similar otra investigación⁸⁷ analizó la incorporación de plásticos reciclados en morteros ecológicos, destacando su impacto positivo en la sostenibilidad del producto.

En el ámbito del hormigón y los morteros celulares, se estudió el desempeño mecánico y térmico de estos prefabricados al incorporar residuos plásticos,⁸⁸ logrando una reducción en el peso de los elementos y una mejora notable en el aislamiento térmico. Asimismo, se ha demostrado que el reemplazo parcial de arena por plásticos reciclados en hormigón estructural no solo disminuye la

⁸² Thongchua, G., Suwan, T., Jitsangiam, P., Wattanachai, P., Kamthai, S., Thongchua, H., . . . Yamuangmorn, S. (2023). *Utilization of Rice Straw Wastes as Aggregate in Lightweight Concrete Block Production by Using Cold Press Technique*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

⁸³ Mahoutian, M., & Shao, Y. (2016). Production of cement-free construction blocks from industry wastes. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1339-1346. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.012

⁸⁴ De Melo, A. B., & Silva, E. P. (2013). Lightweight concrete blocks with EVA recycled aggregate: A contribution to the thermal efficiency of building external walls. *Materiales de Construcción*, 63(312), 479-495. doi: 10.3989/mc.2013.05912

⁸⁵ Aukour, F. J. (2009). Feasibility study of manufacturing concrete eco-blocks using marble sludge powder as raw materials. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 120, 845-852. doi: 10.2495/SDP090792

⁸⁶ Corinaldesi, V., Mazzoli, A., & Moriconi, G. (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials and Design*, 32(3), 1646-1650. doi: 10.1016/j.matdes.2010.10.013

⁸⁷ Aciu, C., Ilutiu-Varvara, D. A., Manea, D. L., Orban, Y. A., & Babota, F. (2018). *Recycling of plastic waste materials in the composition of ecological mortars*. Paper presented at the Procedia Manufacturing.

⁸⁸ Aciu, C., Ilutiu-Varvara, D. A., Manea, D. L., Orban, Y. A., & Babota, F. (2018). *Recycling of plastic waste materials in the composition of ecological mortars*. Paper presented at the Procedia Manufacturing.

huella ambiental del material, sino que también conserva un rendimiento adecuado para aplicaciones estructurales.⁸⁹

Respecto a los morteros de yeso, investigaciones que han explorado la adición de residuos ligeros reciclados como componentes clave reportaron mejoras significativas en propiedades térmicas, eléctricas y funcionales, sugiriendo aplicaciones innovadoras para estos compuestos dentro del sector de la construcción.^{90,91}

Por otra parte, se han estudiado aplicaciones específicas, como la incorporación de residuos en polvo, tales como PVC y resina de poliuretano, para la fabricación de baldosas urbanas. Estos desarrollos destacan la versatilidad de los residuos poliméricos para crear productos con propiedades técnicas competitivas y una menor carga ambiental.⁹²

En conjunto, estas investigaciones subrayan el potencial de los residuos poliméricos como recursos valiosos en la producción de materiales de construcción, promoviendo la economía circular y contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles que satisfacen tanto criterios técnicos como ambientales.

⁸⁹ Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127

⁹⁰ Kumaresan, S., Subramanian, J., Selvaraj, V. K., Lazar, P., Raja, S., Raju, M. P., & Nath, A. K. (2024). *A Comparative Study of Gypsum-Based Composites with Waste Recycling for Electrical Properties in Futuristic Applications*. Paper presented at the Sustainable Civil Infrastructures.

⁹¹ Doleželová, M., Scheinherrová, L., Krejšová, J., Keppert, M., Černý, R., & Vimmrová, A. (2021). Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers. *Construction and Building Materials*, 297. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123791

⁹² Cardinale, T., Sposato, C., Alba, M. B., Feo, A., & De Fazio, P. (2019). Energy performance of construction materials using waste recycled polymer as fine aggregate replacement. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 696-704. doi: 10.18280/ijht.370305

Capítulo

03

Objetivos

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GENERALES

El objetivo global de esta Tesis Doctoral se concreta en la utilización de los residuos generados en la industria del automóvil para su incorporación a la industria del prefabricado del Sector de la Construcción, menos tecnificada y consumidora de una ingente cantidad de recursos naturales (áridos, cemento, energía, agua, emisiones de CO₂, etc.)

Los puntos clave de la investigación llevada a cabo y sus implicaciones son las siguientes:

- **Reducción del uso de áridos.** La utilización de residuos de espuma de poliuretano en lugar de áridos naturales en la producción de materiales de construcción podría reducir significativamente la demanda de estos recursos, contribuyendo así a la conservación de los recursos naturales locales.
- **Sostenibilidad.** Al reemplazar los materiales tradicionales por residuos de poliuretano, se puede lograr un enfoque más sostenible en la industria de la construcción, ya que se reduce la extracción de recursos naturales, se minimizan las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento y se disminuye la cantidad de residuos enviados a vertederos.
- **Versatilidad del poliuretano.** El poliuretano triturado o sus derivados tienen ventajas significativas, como flexibilidad e hidrofobicidad, que los hacen adecuados para su uso en materiales de construcción. En esta Tesis Doctoral se han desarrollado materiales para su empleo como bloques de particiones interiores o exteriores, adoquines y baldosas.
- **Gestión de residuos.** La investigación busca proporcionar una alternativa al depósito de residuos de poliuretano en vertederos, lo que contribuiría a una gestión más responsable de los residuos industriales. La valorización de estos residuos podría convertirlos en recursos valiosos en lugar de desechos.
- **Potencial para la industria de la construcción.** La aplicación de estos nuevos productos aligerados en la construcción podría tener un impacto significativo en el sector, brindando oportunidades para desarrollar materiales más sostenibles y reducir la huella ambiental de la construcción.

En resumen, esta Tesis Doctoral tiene como objetivo abordar un desafío importante en términos de sostenibilidad y gestión de residuos al explorar la viabilidad técnica de utilizar residuos de espuma de poliuretano en la industria de la construcción.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes:

- **Demostrar** cuantitativamente las posibilidades de usar residuos de poliuretano o sus derivados industriales como materia prima y reemplazo del árido para la obtención de prefabricados aligerados con altas prestaciones mecánicas.
- **Desarrollar**, desde su fabricación hasta la colocación en demostrador, prefabricados de hormigón en formato de bloque, adoquín y baldosa con estos residuos poliméricos y sus derivados.
- **Validar** experimentalmente las ventajas de estos productos, particularmente en el ámbito de la fabricación aditiva y del comportamiento mecánico y frente al agua y el fuego.
- **Diseñar** nuevas tecnologías al proporcionar caracterización de alto rendimiento y herramientas de predicción de modelos para aumentar su competitividad y su posibilidad de incorporación al mercado.
- **Evaluar** el análisis del ciclo de vida (ACV) con el fin de cuantificar las ventajas/desventajas de estos nuevos materiales prefabricados medioambientalmente.

Capítulo

04

Experimental

4 EXPERIMENTAL

En este capítulo se detallan los procedimientos operativos empleados en los ensayos destinados a la caracterización de los bloques y adoquines, en sus distintas dosificaciones. Se abordarán metodologías específicas para evaluar su aspecto visual, resistencia estructural, permeabilidad, resistencia al desgaste y otras propiedades mecánicas. Se resaltarán la relevancia crucial de los ensayos realizados en el laboratorio para asegurar la calidad y la durabilidad óptimas de estos materiales.

A continuación, se describen los ensayos realizados.

4.1 ASPECTOS VISUALES

Se examina la cara vista de todos los adoquines y bloques, los cuales no deben presentar defectos tales como grietas o exfoliaciones, tampoco deben observarse eflorescencias, aunque en caso de su existencia estas no son perjudiciales para el comportamiento de estos materiales cuando se encuentren en uso como solados, por lo tanto, no se van a tomar en cuenta de manera relevante en el marco de esta investigación si se viesen pequeñas grietas o exfoliaciones.

4.2 DENSIDAD APARENTE

Se ha medido la densidad en estado endurecido de los bloques/adoquines de acuerdo con el estándar vigente. Después de un curado de 28 días a una temperatura de 20°C y humedad relativa del 98%.⁹³ Cada unidad se pesará con una balanza normalizada para evaluar las diferencias en densidad aparente respecto a las muestras de referencia.

Este parámetro es crucial para evaluar la calidad y las propiedades físicas del bloque, incluyendo su resistencia estructural y su capacidad de aislamiento térmico y acústico.

4.3 DUREZA SUPERFICIAL

El ensayo de dureza Shore C se realiza en bloques mediante un penetrador con una punta cónica o durómetro que ejerce una fuerza específica sobre la

⁹³UNE-EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo para mortero para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente seca del mortero endurecido.

superficie del material.⁹⁴ Este método mide la resistencia del bloque a la penetración bajo una carga estática, registrándose la profundidad de la penetración en la superficie del bloque después de aplicar una fuerza estándar durante un tiempo determinado. La proyección debe ser vertical y en varias zonas de la superficie de una probeta prismática de 200 x 100 x 60 mm, hallándose la media de las medidas obtenidas. La dureza se indica en unidades Shore C. Se trata de una escala que va del 0 al 100, donde se considera el 0 como el material más blando y el 100 como el material con mayor dureza. (Figura 4.1)

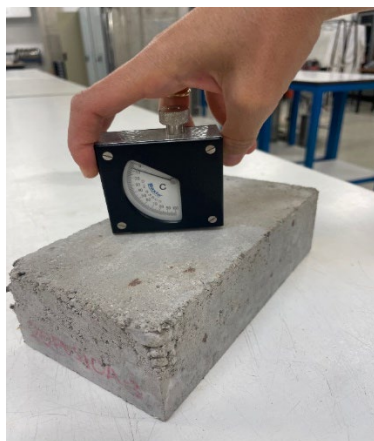


Figura 4.1 Ensayo Dureza Shore C en adoquín

4.4 ABSORCIÓN DE AGUA

A efectos de asegurar las propiedades y un correcto uso para el empleo de este tipo de elementos, es necesario realizar una comprobación de la absorción del agua que presenta cada unidad, teniendo en cuenta que la normativa específica un marcado 2B que deben cumplir todos los adoquines en España, teniendo que presentar unos valores de absorción total de agua $\leq 6\%$ en masa.⁹⁵

Para llevar a cabo este ensayo se estudiarán 3 probetas de cada dosificación, acondicionándolas previamente a la temperatura indicada y mediante la eliminación de desconchones, para a continuación sumergirlas en agua según se indica en la norma de aplicación. Se mantendrán sumergidas al menos 3 días hasta masa constante para después repetir este proceso durante 3 días en una

⁹⁴UNE-EN 12390-3:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

⁹⁵UNE-EN 127338:2022. Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón.

estufa de secado hasta conseguir una diferencia en las pesadas inferior al 0,1% (Figura 4.2).

Una vez que las probetas se han enfriado, se procederá a realizar las pesadas correspondientes, determinándose el valor de absorción de agua W_a a través de la siguiente Ecuación 4.1:

$$W_a(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot 100 \quad 4.1$$

Donde:

M_1 es la masa inicial de la probeta, expresada en gramos.

M_2 es la masa final de la probeta, expresada en gramos.



Figura 4.2 Adoquines sumergidos en agua

4.5 RESISTENCIAS MECÁNICAS

Otro de los parámetros que deben ser analizados es la resistencia a rotura de los materiales.

4.5.1 Resistencia mecánica en adoquines

El ensayo de resistencia a compresión en adoquines de hormigón se realiza según la norma UNE 1338.⁹⁶ Los adoquines se seleccionan en su estado completo, eliminando cualquier rebaba, saliente u otro defecto superficial. En caso de que la superficie del adoquín sea rugosa, texturada o curva, se prepara mediante refrentado mecánico o relleno, minimizando la cantidad de material removido para garantizar una superficie plana.

Previo al ensayo, los adoquines son sumergidos en agua a una temperatura de (20 ± 5) °C durante un periodo de (24 ± 3) horas, posteriormente secados y ensayados de manera inmediata.

⁹⁶UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo

La máquina de compresión utilizada debe ser capaz de aplicar cargas uniformes y continuas con alta precisión. En este caso, se emplea una prensa hidráulica modelo Suzpecar MEM-101/SDC (Figura 4.3.b) la cual dispone de una capacidad adecuada para soportar la resistencia máxima esperada de los adoquines, con una precisión de $\pm 1\%$ en la medición de la carga, garantizando resultados confiables.

La configuración del equipo incluye dos soportes rígidos cuyas superficies de contacto tienen un radio de curvatura de (75 ± 5) mm. Estos soportes deben mantenerse en un plano vertical con una tolerancia de ± 1 mm en sus extremos. El soporte superior tiene la capacidad de girar sobre su eje transversal. Las piezas de compresión empleadas presentan un ancho de (15 ± 1) mm, un espesor de (4 ± 1) mm, y una longitud que excede en al menos 10 mm el plano de fractura previsto. Adicionalmente, las placas de carga deben ser lisas, rígidas y suficientemente grandes para cubrir completamente las superficies de los adoquines, evitando cualquier deformación durante el ensayo.

El procedimiento consiste en aplicar una carga axial de manera continua y uniforme, con una velocidad controlada de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s, hasta que se produce la falla del adoquín. En el momento de la rotura, se registra la carga máxima alcanzada, dato que es fundamental para la evaluación de la resistencia del material.

4.5.2 Resistencia mecánica en bloques

El ensayo de resistencia a compresión en bloques de hormigón, de acuerdo con la norma UNE-772-1⁹⁷ requiere un procedimiento estricto para garantizar resultados fiables y reproducibles. Los bloques deben prepararse cuidadosamente antes de someterlos a la prueba, siendo un paso esencial el refrentado con mortero. Este proceso nos permite obtener superficies lisas y uniformes, asegurando una distribución homogénea de la carga aplicada y evitando concentraciones locales de esfuerzo que puedan afectar los resultados del ensayo.

Previo a la ejecución de la prueba, las muestras son acondicionadas en un ambiente controlado, manteniéndose a una temperatura de (20 ± 5) °C y una humedad relativa de $(65 \pm 5\%)$ durante un periodo mínimo de 24 horas. Este acondicionamiento es crucial para estabilizar las propiedades del material,

⁹⁷UNE-EN 772-1. Métodos de ensayo para bloques de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.

evitando variaciones en los resultados debido a cambios en la temperatura o el contenido de humedad.

El ensayo se lleva a cabo utilizando una prensa hidráulica con capacidad suficiente para soportar la carga máxima esperada y con una precisión de medición de carga de $\pm 1\%$, como el modelo Siemens OR325A (Figura 4.3) Las muestras refrentadas se colocan cuidadosamente en la prensa, asegurando que las superficies refrentadas estén perfectamente alineadas con el eje de carga.

La carga se aplica de manera uniforme y continua, con una velocidad controlada de entre 0,2 y 1,0 MPa/s, hasta que se produce la rotura del bloque.



Figura 4.3 Ensayo rotura a compresión en prensa normalizada
a. Vista general de la prensa normalizada en el ensayo de bloque refrentado. b. Adoquín dispuesto para el ensayo

Se registran los valores de la carga de rotura y se calcula la superficie de rotura, S (mm^2), la resistencia a rotura, T (MPa), y la carga de rotura por unidad de longitud, F (N/mm), de acuerdo con las ecuaciones 4.2-4.4. La resistencia característica a la rotura T no debe ser inferior a 3,6 MPa, no teniendo ninguna de las muestras una resistencia menor a 2,9 MPa y una carga de rotura F inferior a 250 N/mm, determinándose estos valores mediante las ecuaciones 4.2-4.4.

$$S = l \cdot t \quad 4.2$$

$$T = 0,637 \times k \times \frac{P}{S} \quad 4.3$$

$$F = \frac{P}{l} \quad 4.4$$

En las ecuaciones anteriores, P (N), es la carga de rotura, k , un factor de corrección para el espesor del adoquín, T (mm) el espesor del adoquín y, l (mm), la longitud de rotura.

4.6 RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN

Al tratarse de prefabricados cuya principal utilidad es su colocación en solados, es necesario conocer la resistencia que presentan estos frente a la abrasión externa, propia del uso que van a tener. Para ello, se realizará el ensayo desgastando la cara vista de cada uno de los adoquines, en este caso 3 muestras de cada dosificación, introduciéndolos en el equipo de ensayo del Disco Ancho. A través de unas tolvas, se suministra el material abrasivo corindón, pasando este por del disco que genera el desgaste sobre la cara de ensayo. (Figura 4.4)



Figura 4.4 Ensayo de desgaste por abrasión mediante equipo de Disco Ancho

Este proceso se realiza siguiendo las indicaciones que facilita la norma de aplicación,⁹⁸ en la cual se indica que la probeta de ensayo debe tener unas dimensiones de al menos 100x70 mm y que en este parámetro el adoquín debe tener una marcado 3H, por lo que los valores de la huella marcada en la cara vista deben ser inferiores a 23 mm.

4.7 RESISTENCIA AL HIELO/DESHIELO

Con el fin de evaluar el comportamiento de los adoquines cuando se colocan en ambientes exteriores, se han realizado ensayos de envejecimiento acelerado consistiendo en ciclos de hielo-deshielo y cristalización salina, según los criterios de la norma, estableciendo la resistencia a la compresión antes y después del ensayo, y en consecuencia se puede evaluar la pertinencia de utilizarlos en estas condiciones. (Figura 4.5)

Se colocan tres adoquines de cada dosificación en la cámara de congelación manteniendo la superficie de ensayo en el plano horizontal y sometiéndolo a 28

⁹⁸UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

ciclos de congelación/descongelación cubriendo la superficie con una solución al 3% de cloruro de sodio (NaCl).

Los resultados se miden en kg/m^2 midiendo el material desprendido del adoquín durante el ensayo.



Figura 4.5 Ensayo hielo-deshielo

4.8 CRISTALIZACIÓN DE SALES

Para el ensayo de cristalización salina, se ha seguido la norma para métodos de ensayo de piedra natural.⁹⁹ Este procedimiento implica la toma de muestras representativas, el control preciso de condiciones ambientales y la aplicación de inhibidores de incrustaciones. Se monitorea la formación de cristales, registrando los resultados bajo los parámetros establecidos.

Se ensayan 3 adoquines de cada dosificación durante 15 ciclos, utilizando una solución de sulfato sódico decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) al 14%.

4.9 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO/RESBALAMIENTO SDRV

Este ensayo se ha desarrollado también siguiendo la norma UNE-EN 1338:2004.¹⁰⁰ Según esta norma, la resistencia al deslizamiento se evalúa mediante un ensayo de tracción dinámica en húmedo, en el que se mide la fuerza necesaria para deslizar una esfera de acero sobre la superficie del revestimiento.

⁹⁹UNE-EN 12370:2020. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.

¹⁰⁰UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

Otro de los análisis necesarios para este tipo de piezas por su uso en la resistencia al deslizamiento/resbalamiento que presentan, que por norma general es satisfactoria en todas aquellas piezas que no tengan su cara vista pulida.

En este ensayo se utilizará un Péndulo de Fricción para determinar la resistencia al deslizamiento/resbalamiento sobre los eco-adoquines sin pulir, realizando esta operación sobre 5 muestras de cada dosificación, siguiendo las indicaciones de la normativa de aplicación. Estas muestras deben permitir una superficie de ensayo de 136 x 86 mm y estar sumergidas en agua al menos 30 min antes de ensayarse en las condiciones marcadas en la norma. A continuación, se fijan los eco-adoquines en el equipo y se realiza el ensayo en la cara vista 5 veces, para después girar la muestra 180º y volver a realizar 5 repeticiones.



Figura 4.6: Equipo del Péndulo de Fricción modelo Munro-Stanley London.

4.10 RESISTENCIA AL FUEGO. ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD

Según la norma UNE-EN 13501-1:2019¹⁰¹ y según la Decisión 96/603/CE de la Comisión,¹⁰² los materiales de construcción se pueden clasificar en siete clases principales (A1, A2, B, C, D, E y F) según su combustibilidad frente al fuego.

¹⁰¹UNE-EN 13501-1:2009. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación.

¹⁰²EUR-Lex. “Decisión 96/603/CE” from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A31996D0603>

La clase A1 indica la máxima resistencia al fuego (no combustibles), mientras que F representa materiales sin comportamiento evaluado.

Para clasificar los bloques de esta investigación primero ejecutamos el ensayo EN ISO 1182¹⁰³ que evalúa la reacción al fuego de productos homogéneos y no combustibles. Este método se utiliza para determinar si un material contribuye a la propagación del fuego en edificaciones y consiste en someter una muestra cilíndrica del material a altas temperaturas en un horno vertical a 750°C, durante un tiempo controlado (Figura 4.7). Se mide con ello la pérdida de masa, la temperatura de la muestra y la presencia de llamas. Un material cumple con el ensayo si no arde, su temperatura no aumenta significativamente y su pérdida de masa es mínima.

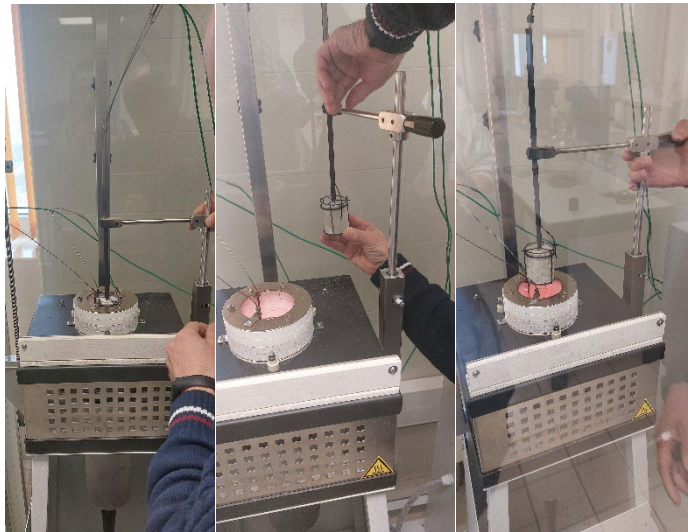


Figura 4.7: Ensayo de reacción al fuego de bloques.

Para los adoquines y tal como indica la norma sin necesidad de ensayo, se clasifican como A1 ya que cumplen los requisitos de comportamiento frente al fuego exterior.

¹⁰³UNE-EN ISO 1182:2021. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.

4.11 PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Para la ejecución de este ensayo se han seguido los requisitos indicados en la norma UNE-EN 1015-19,¹⁰⁴ la cual especifica los protocolos y requisitos para llevar a cabo ensayos de permeabilidad al vapor de agua de las mezclas.

El propósito fundamental es evaluar la capacidad de los bloques para resistir el flujo de vapor de agua a través de su estructura, con el fin de determinar su eficacia en la prevención de la penetración hídrica y, consecuentemente, su resistencia a la humedad.

El procedimiento general implica la exposición de los bloques a condiciones simuladas de lluvia, empleando equipos especializados para medir el caudal de agua que atraviesa la muestra y cuantificar la cantidad de líquido que penetra en un intervalo de tiempo definido.

Para realizar el ensayo en el laboratorio se fabrican tres probetas cilíndricas de 16 cm de diámetro y 1,5 cm de altura de cada una de las mezclas sobre un soporte de hormigón. Una vez desecadas las probetas se colocan en los moldes de ensayo en los que previamente se vierte una disolución saturada de nitrato de potasio (KNO_3), dejando una cámara de aire entre la disolución y la superficie inferior de la probeta de 10 mm. La estanqueidad entre la probeta y el molde se consigue mediante el sellado de la junta con mástico.¹⁰⁵



Figura 4.8 Ensayo permeabilidad

La hermeticidad entre la probeta y el molde se logra mediante la aplicación de un sellador en la unión. Las probetas deben ser almacenadas en un entorno

¹⁰⁴UNE-EN 1015-19:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.

¹⁰⁵Alameda, L. (2014) Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra. [Tesis doctoral] Universidad de Burgos.

con una temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa del $50\pm 5\%$. Se realizan mediciones de los recipientes en intervalos de tiempo adecuados hasta que se alcanza una reducción de peso lineal (mínimo 10 días), indicando que las condiciones son estables.

Se registra la pérdida de masa y se representa en relación con el tiempo.

A partir de los datos recopilados, se procede al cálculo de la permeancia en unidades de $\text{Kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$, la cual representa el flujo de vapor de agua que atraviesa la probeta. Multiplicando el valor de la permeancia por el grosor de las probetas que es $0,016\text{ m}^2$, se obtiene la permeabilidad al vapor de agua del material.

Capítulo

05

**Caracterización de
materias primas**

5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

En este apartado se caracterizan las materias primas empleadas en la fabricación de los adoquines y bloques; cemento, árido, residuo de poliuretano, agua y aditivos.

5.1 CEMENTO

En la elaboración de los morteros para las propiedades en estado fresco y endurecido se ha empleado cemento CEM I 52,5 R, con al menos un 95% de Clinker y un 5% de componentes minoritarios suministrado por la empresa Portland Valderrivas (Mataporquera, España), acorde a la norma EN 197-1.¹⁰⁶

La resistencia a la compresión a los 28 días es $\geq$ de 52,5 MPa, con un tiempo de fraguado superior a 45 minutos, una expansión de volumen inferior a 10 mm y una densidad aparente de 110 kg/m³.

El cemento elegido es un producto sin adiciones, su alta velocidad de generación de calor de hidratación lo hace especialmente apto para su uso en tiempo frío, está destinado para su empleo en hormigones en masa, armados y pretensados, así como en hormigones de alta resistencia, tanto inicial como final. Adecuado para la elaboración de elementos prefabricados.



Figura 5.1 Cemento empleado CEM I 52,5R

5.2 ÁRIDO SILÍCEO

Los áridos utilizados, tanto en el mortero patrón de referencia como en las dosificaciones con sustitución de árido por poliuretano y aditivos son de carácter

¹⁰⁶UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

silíceo, denominados como “árido 0/4 silíceo rodado”, procedentes de una cantera a cielo abierto localizada en Cubillo del Campo, Burgos (España).

Según la localización de esta cantera, la zona geográfica pertenece a la “Formación de Arenas de Utrillas” y está formada por conglomerados cuarcíticos, arenas caoliníferas y lutitas, situados en lechos sedimentarios en un terreno con una facies superficial que presenta importantes plegamientos. La composición mayoritaria de esta arena es sílice, con más del 98% de granos de cuarzo y cuarcitas, también contiene trazas de partículas micáceas y de areniscas.



Figura 5.2 Aspecto general del árido empleado

En la Tabla 5.1 se recogen las características técnicas de la arena referidas a las Normas Europeas de valoración UNE-EN. Tras estos análisis, y ya determinadas las características referidas a las muestras de arena, podemos clasificarla como “arena cuarcífera”.¹⁰⁷

Los áridos para morteros están regulados en la norma EN 13139.¹⁰⁸ En esta norma se detallan las características de los áridos y del filler obtenidos por un proceso natural, materiales fabricados o reciclados y las mezclas de estos áridos para utilizarlos en morteros. Dichos áridos están formados por arenas naturales de depósitos sedimentarios a cielo abierto, lavadas y clasificadas o por arenas de machaqueo obtenidas por trituración y molturación, clasificadas por tamices.¹⁰⁹

En esta arena también se ha comprobado la presencia de materia orgánica, con resultado negativo, y el contenido en arcillas, que es despreciable. En general presenta una gran pureza ya que, como se ha comentado anteriormente, la mayoría es de naturaleza silícica y su aspecto es bastante fracturado pero adecuado para su uso en morteros.

¹⁰⁷UNE-EN 13139:2003 Áridos para morteros.

¹⁰⁸UNE-EN 13139:2003 Áridos para morteros.

¹⁰⁹Arroyo, R. (2017) Addition of new polymer-based and mineral-based fillers in mortar: influences of polyurethane and afwillite on the microstructure and final properties. [Tesis doctoral] Universidad de Burgos.

Ensayo	Norma	Resultado
Contenido de finos (%)	UNE-EN 933-1:2012	0,78
Equivalente de arena (unidades)	UNE-EN 933-1:2012	78
Densidad real (g/cm ³)	UNE-EN 1097-6:2001	2,619
Coefficiente de absorción normal (%)	UNE-EN 1097-6:2001	15,0
Densidad real saturada seca (g/cm ³)	UNE-EN 1097-6:2001	2,630
Contenido de terrones de arcilla (%)	UNE 7133:1958	0,01
Contenido de partículas de bajo peso específico (%)	UNE-EN 1744-1:1999	0,00
Coefficiente de forma del árido grueso (unidades)	UNE-EN 933-4:2000	0,26
Contenido de partículas blandas (%)	UNE 7134:1958	0,93
Contenido total de azufre (%)	UNE-EN 1744-1:2010	0,00
Contenido de sulfatos solubles en ácidos (%)	UNE-EN 1744-1:2010	0,00
Contenido de cloruros (%)	UNE-EN 1744-1:2010	0,00

Tabla 5.1 Características del árido empleado

Se ha llevado a cabo un estudio granulométrico para conocer la composición cuantitativa de la arena, así como su distribución en la serie de tamices según EN 933-2.¹¹⁰ La curva granulométrica se describe en la Figura 5.3 y en la Tabla 5.2 se muestra el porcentaje que pasa de la arena estudiada.

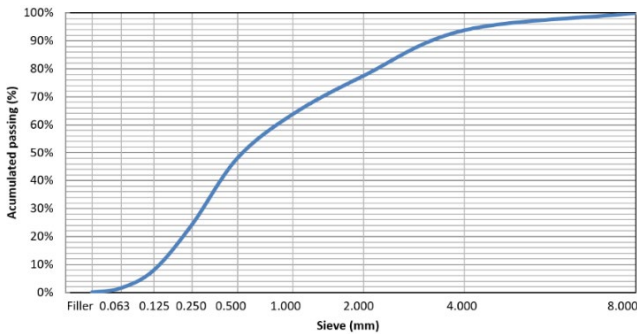


Figura 5.3 Curva granulometría árido empleado

¹¹⁰UNE-EN 933-2:2022. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL ÁRIDO						
Luz Tamiz mm	Retenido (gramos)		% Retenido	Acumulado	% Pasa	Acumulado
	Parcial	Acumulado	Parcial		Parcial	
8,000	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
4,000	92,28	92,28	6,17%	6,17%	93,83%	93,83%
2,000	243,12	335,40	16,26%	22,44%	83,74%	77,56%
1,000	206,60	542,00	13,82%	36,26%	86,18%	63,74%
0,500	234,68	776,68	15,70%	51,95%	84,30%	48,05%
0,250	353,88	1130,56	23,67%	75,63%	76,33%	24,37%
0,125	244,40	1374,96	16,35%	91,98%	83,65%	8,02%
0,063	96,83	1471,79	6,48%	98,45%	93,52%	1,55%
Filler	23,12	1494,91	1,55%	100,00%	98,45%	0,00%
	1494,91		100,00%			
Módulo de finura (MF)			2,84%			

Tabla 5.2 Análisis granulométrico



Figura 5.4 Serie de tamices normalizados empleados en la granulometría



Figura 5.5 Retenido del árido según el tamiz

5.3 AGUA

El agua que se ha empleado para realizar los ensayos y elaborar las probetas procede de la red pública de Burgos. El análisis químico de esta agua se expresa en la Tabla 5.4.¹¹¹

Parámetros Físicoquímicos	Unidades	Resultados	Valor Paramétrico (Máx. permitido)
Olor	índice de dilución	1	3 a 25°C
Sabor	índice de dilución	1	3 a 25°C
Color	mg/L Pt/Co	5	15
pH	-	8,01	6,5< pH <9,5
Turbidez	UNF	0,3	1
Conductividad	μS/cm	104,4	2500
Nitratos	mg/L	<5,0	50
Nitritos	mg/L	<0,03	0,1
Amonio	mg/L	<0,25	0,50
Cloro libre residual	mg/L	0,44	1,0
Fluoruro	mg/L	<0,10	1,5
Sodio	mg/L	9,7	200
Cloruro	mg/L	21,3	250
Sulfato	mg/L	19,8	250
Calcio	mg/L	16,9	-
Dureza Total	°F	4,7	-
Bicarbonato	mg/L	54,9	-
Hierro	mg/L	<0,0001	0,2
Aluminio	mg/L	0,04	0,2
Cobre	mg/L	<0,001	2,0
Suma de trihalometanos	mg/L	<0,01	0,1
Índice de Langelier	-	-0,4	
Escherichia coli	UFC en 100mL	0	0
Clostridium perfringens	UFC en 100mL	0	0
Bacterias Coliformes	UFC en 100mL	0	0
Recuento de colonias a 22°C	UFC en 1mL	8	100

Tabla 5.3 Características del agua empleada según RD 140/2003

El agua procedente de la red suministrada por Aguas de Burgos S.A se almacena previamente en unos depósitos en el interior del taller hasta alcanzar una temperatura constante de unos $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para poder realizar los ensayos.

¹¹¹Aguas de Burgos. “Análisis del agua según RD 140/2003” from [https://aguasdeburgos.com/wp-content/uploads/2017/08/Agua TRATADA 2014.pdf](https://aguasdeburgos.com/wp-content/uploads/2017/08/Agua_TRATADA_2014.pdf)

5.4 ESPUMA DE POLIURETANO

Los residuos poliméricos que se utilizan como aligerantes de estos morteros para sustitución de diferentes porcentajes de árido son espumas de poliuretano de color gris, procedentes de residuos del proceso de fabricación de paneles aislantes para techos en la industria del automóvil de la fábrica Grupo Antolín, en Burgos. Las dimensiones de dichos paneles son aproximadamente de 1,60 m x 1,00 m y su espesor es de 1 cm.

El material se tritura y tamiza mediante un Molino RETSCH SM100 y un tamiz de 4,00 mm de luz de malla.



Figura 5.6 Residuos de techo triturados

Para la determinación de la morfología y tamaño de las partículas de poliuretano triturado reciclado se ha realizado microscopía óptica, usando el microscopio MORPHOLOGI G3 de MALVERN. Para ello se colocaron tres cucharadas de la muestra de 19 mm³ en la cámara de dispersión, las cuales fueron dispersadas con aire comprimido de forma automática en la pletina del microscopio. A continuación, mediante el uso de una *macro* creada a medida para el análisis de estas muestras que combinaba los objetivos de 2,5 y 50 aumentos (cubriendo el rango de tamaños que va desde 0,5 μm hasta 1000 μm) se analizaron de forma automática tres réplicas de la muestra.

En la Figura 5.7 se muestra la frecuencia relativa en número (eje y) en función del diámetro de partícula (μm) (eje X) de las tres medidas llevadas a cabo, mientras que en la Figura 5.8 se muestra la misma distribución, pero en volumen.¹¹²

¹¹²Informe MI I-2021-0007 CENIEH Laboratorio de Microscopía y Microtomografía Computarizada.

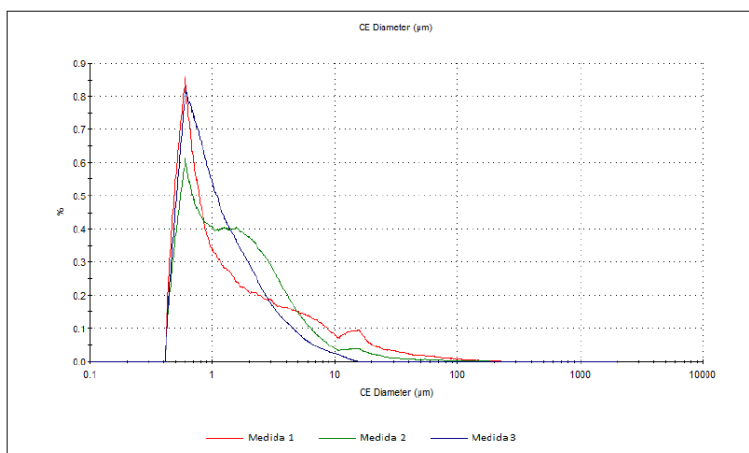


Figura 5.7 Frecuencia relativa en número en función del diámetro de partícula

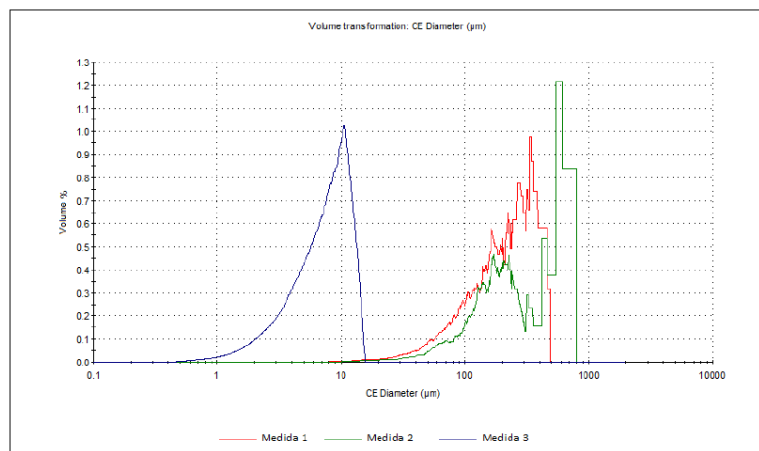


Figura 5.8 Frecuencia relativa en volumen en función del diámetro de partícula

En la Tabla 5.4 se puede ver la morfología de las partículas estudiadas. A modo de ejemplo, se muestra una partícula del rango de tamaños más pequeño, otra de un tamaño intermedio y otra que representa a las partículas más grandes de cada una de las muestras analizadas. Las imágenes no se muestran a la misma escala (se indica el diámetro de cada una de ellas) para poder apreciar los detalles morfológicos.

Muestra	Imagen rango Tamaños pequeños	Imagen rango Tamaños intermedios	Imagen rango Tamaños más grandes
Medida 1 (N.º total de partículas analizadas 17753)	 Diámetro = 0,95µm	 Diámetro = 33,50µm	 Diámetro = 255,97µm
Medida 2 (N.º total de partículas analizadas 45572)	 Diámetro = 1,12µm	 Diámetro = 29,57µm	 Diámetro = 248,00µm
Medida 3 (N.º total de partículas analizadas 75595)	 Diámetro = 0,97µm	 Diámetro = 8,03µm	 Diámetro = 12,94µm

Tabla 5.4 Imágenes representativas de cada una de las medidas llevadas a cabo

En la Tabla 5.6 y Tabla 5.7 se recogen los valores del diámetro medio, así como del diámetro de la distribución al 10, al 50 y al 90% (D10, D50 y D90, respectivamente) para cada medida.

	D [4,3] (µm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
Medida 1	4,6	0,54	1,1	9,55
Medida 2	3	0,56	1,36	4,9
Medida 3	1,51	0,55	0,95	3,02
Promedio	3,04	0,55	1,14	5,82
Desviación estándar	1,55	0,01	0,21	3,36

Tabla 5.5 Valores medios del diámetro de partícula (D [4,3]), así como del diámetro de la distribución al 10, al 50 y al 90% (D10, D50 y D90) para cada una de las muestras analizadas por microscopía óptica. Los resultados se dan para la distribución en número de la curva promedio de las medidas

	D [4,3] (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Medida 1	235,1	80,05	240,9	402,8
Medida 2	393,5	109,4	377,3	657,7
Medida 3	7,64	2,99	7,74	11,87
Promedio	212,08	64,15	208,65	357,46
Desviación estándar	193,96	54,96	186,88	325,29

Tabla 5.6 Valores medios del diámetro de partícula (D [4,3]), así como del diámetro de la distribución al 10, al 50 y al 90% (D10, D50 y D90) para cada una de las muestras analizadas por microscopía óptica. Los resultados se dan para la distribución en volumen de la curva promedio de las medidas.

Como conclusión a los análisis realizados se puede decir que, de forma general, la mayor parte de las partículas se encuentran por debajo de las 2-3 μm.

5.5 ADITIVOS

Los aditivos empleados en la fabricación de morteros y prefabricados son superplastificantes y reductores de agua de alta actividad, utilizados para la producción de hormigones con altas resistencias, baja viscosidad y mejorada reología.

Entre estos aditivos, solo el MasterEase 5025 actúa como un superplastificante líquido/reductor de agua de alta actividad. Este aditivo, basado en la nueva tecnología de polímeros PAE (fosfónicos) de la casa comercial BASF®, está diseñado específicamente para la producción de hormigones con alta resistencia, baja viscosidad y reología mejorada. Se recomienda emplearlo en un porcentaje que oscila entre 0,5% y 1,5% sobre el peso del cemento, con una densidad de 1,058 g/cm³. Para la presente investigación se emplea en un 0.8%

Por otro lado, el Lutensol TO 3 (POS1B en bloques), también de BASF®, es un surfactante no iónico en forma líquida, cuya base química son los "alcoholes etoxilados" (C13-Oxo alcohol + 3 EO) así como el Lutensol TO 7 (alternativamente POS2B) (C13-Oxo alcohol + 7 EO. Ambos aditivos contribuyen a mejorar las propiedades deseadas de los morteros y reducen la cantidad de agua necesaria en las dosificaciones.

En Tabla 5.7 se describe el balance hidrofílico-lipofílico (HLB), calculado mediante el método de Griffin: $HLB = 20 Mh/M$, donde Mh es la masa molecular de la parte hidrofílica de la molécula y M la masa molecular total. La cantidad de aditivo utilizado es del 1% en relación con el peso del cemento. Esta modificación

de los elementos prefabricados ayuda a mantener su resistencia mecánica, obteniendo así materiales reciclados con propiedades estructurales, así como densidades más bajas que los morteros.¹¹³

Surfactante	Unidad hidrofóbica	Unidad hidrofílica	Valor HLB	Comentarios
<i>T03 en adoquines S1 en bloques</i>	C13=200g	3EO = 132 g	6,1	Muy hidrófilo
<i>T07 en adoquines S2 en bloques</i>	C13=200g	7EO=308 g	12,1	Menos Hidrófilo
<i>MasterEase 5025</i>	C10 = 158g	4EO = 176g	10,5	Superplastificante. Riesgo de disgregación a dosis elevadas. Utilizado en los adoquines

Tabla 5.7 Valores HLB para los diferentes surfactantes empleados



Figura 5.9 Aditivos empleados; T03 (izq.), T07 (centro) y MasterEase5025 (dcha.)

¹¹³Science Direct. L. Alameda Cuenca-Romero, R. Arroyo, Á. Alonso, S. Gutiérrez-González, V. Calderón. “Caracterización de las propiedades y comportamiento al fuego de bloques de cemento con residuos de cubierta de poliuretano reciclado” (2022) from <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104075>

Capítulo

06

**Adoquines de
cemento aligerados
con residuos
industriales de
poliuretano**

6 ADOQUINES DE CEMENTO ALIGERADOS CON RESIDUOS INDUSTRIALES DE POLIURETANO

6.1 PROCESO DE ELABORACIÓN

Para la elaboración de los adoquines se mezclan, por un lado, los residuos de techo de poliuretano triturados, con el cemento y los áridos y, por otro, el agua y el aditivo. Se amasan en la hormigonera y luego se colocan en los moldes, donde se vibran y compactan. (Figura 6.1)



Figura 6.1 Proceso de elaboración adoquines

Los adoquines resultantes de este proceso de fabricación presentan unas dimensiones de $200 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$, con una forma prismática rectangular (Figura 6.2). Todas sus caras y aristas son rectas y sin imperfecciones, siendo estos parámetros adecuados para su uso en solados de obras de construcción e ingeniería civil, ya que cumplen con los parámetros de comercialización estándar.

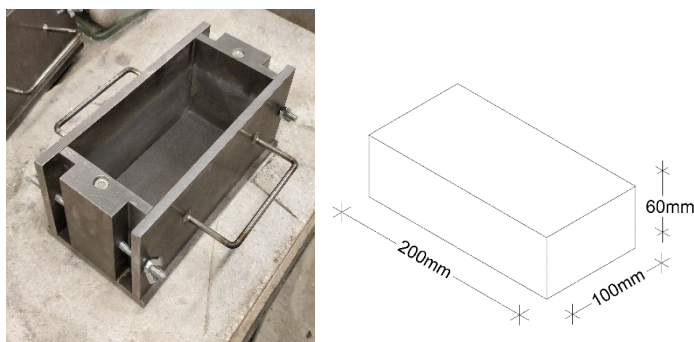


Figura 6.2 Molde empleado (izq.); Dimensiones adoquín

Los adoquines prefabricados han sido ensayados a 28 días cumpliendo las indicaciones establecidas por las siguientes normas europeas.

- UNE-EN 1338:2004¹¹⁴: Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

En esta norma europea se establecen las especificaciones y métodos de ensayo para los adoquines de hormigón. Define los requisitos para la resistencia a la compresión, la absorción de agua, la resistencia a la flexión, la resistencia a la abrasión y la resistencia al desgaste, además, se establecen los requisitos dimensionales y de uniformidad para los adoquines. La norma se aplica a adoquines utilizados en pavimentos y revestimientos, y es importante para garantizar la calidad y la durabilidad de estos productos

- UNE 127338:2022.¹¹⁵ Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón.

Aquí se determinan las propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón. Estipula los requisitos para los adoquines de hormigón, incluyendo la clasificación en función de su resistencia a la compresión, la dimensionalidad y la uniformidad de los adoquines, la resistencia a la flexión, la resistencia a la abrasión, la resistencia al desgaste, la absorción de agua y la resistencia a la congelación y descongelación. Además, la UNE 127338:2007 establece los requisitos para la compatibilidad de los adoquines con las juntas de dilatación y su resistencia a la tracción en juntas de unión. También se definen las condiciones para la recepción de los adoquines en el lugar de la obra, incluyendo los criterios para la inspección y pruebas antes de su instalación.



Figura 6.3 Aspecto visual adoquines

¹¹⁴UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

¹¹⁵UNE-EN 127338:2022. Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón.

6.1.1 Dosificaciones

Se fabrica una primera dosificación de referencia (Tabla 6.1). Posteriormente, se sustituye la cantidad de árido por cantidades variables de residuo (20%, 40% y 60%, en volumen), incorporando el aditivo que proporciona una mejor compactación de la matriz debido a la menor demanda de agua del mortero, mejorando así sus propiedades mecánicas.

	Muestra	Cemento (kg)	Árido (kg)	Residuo de poliuretano (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)
Referencia	P10A	0,60	1,80	0,00	0,18	0,000
Adoquines	20PUS10A	0,60	1,44	0,020	0,18	0,005
	40PUS10A	0,60	1,08	0,040	0,18	0,005
	60PUS10A	0,60	0,72	0,060	0,18	0,005

Tabla 6.1 Dosificaciones adoquines

Se han tomado los valores necesarios para fabricar un adoquín de cada serie como referencia, extrapolando estos datos a las cantidades necesarias para fabricar tandas con más cantidad de adoquines en cada caso. La cantidad de agua permanece constante en todas las muestras debido a la acción del aditivo en contrapartida de la inclusión del residuo respecto a las muestras de referencia, ya que este disminuye la cantidad de agua necesaria a mayores que implica cada sustitución.

6.2 CARACTERIZACIÓN

Una vez se han ejecutado todos los procedimientos experimentales requeridos conforme a la norma EN 1338,¹¹⁶ y siguiendo las directrices estipuladas para los prefabricados en España según la normativa EN 127338¹¹⁷ se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos para asegurar su conformidad con los estándares mínimos aplicables en cada situación. Luego, se procede a comparar los parámetros alcanzados por los adoquines con los productos convencionales, con el fin de evaluar si las características de las materias primas utilizadas presentan mejoras o deterioros en relación con los resultados de referencia. De este modo, se verifica si tanto la fabricación como el uso de estos

¹¹⁶UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

¹¹⁷UNE-EN 127338:2022. Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón.

nuevos elementos prefabricados son respetuosos con el medio ambiente en el contexto de pavimentación en construcción e ingeniería civil.

Las muestras tienen una forma prismática rectangular con todas sus aristas rectas, presentando sus 6 caras lisas y con cierta rugosidad típica de este tipo de prefabricados, permaneciendo estas sin pulir en todos los casos y con un color grisáceo. No se observan grietas o exfoliaciones en sus caras ni eflorescencias. (Figura 6.4).



Figura 6.4 Aspecto visual adoquines; REF (izq.); 20 % (centro-izq.); 40% (centro-dcha.); 60 % (dcha.)

En cuanto a las propiedades físicas y mecánicas, se observa una ligera reducción en estos parámetros proporcional al incremento en el porcentaje de residuo empleado, pero siempre dentro de los parámetros mínimos exigidos por la norma de aplicación y cercanos a los resultantes de los adoquines tradicionales de referencia. (Tabla 6.2)

Por el contrario, uno de los aspectos en los que se observa una mejora sustancial es en la densidad aparente de los adoquines con inclusión de residuos de poliuretano en detrimento del árido, que ven reducido su peso de forma proporcional al incremento de porcentaje de sustitución, proporcionando una mejora que reduce los efectos físicos, económicos y logísticos de su fabricación, manipulación, transporte y puesta en obra.

	Muestra	Densidad en seco (Kg/m ³)	Dureza Shore C	Resistencia a Compresión (MPa)	Carga de rotura (N/mm)
Referencia	P10A	2320	93	4,80	515
Adoquines	20PUS10A	2180	90	5,10	565
	40PUS10A	2140	86	4,30	482
	60PUS10A	2020	85	3,80	420
Requerimiento mínimo		-	-	3,60	250

Tabla 6.2 Caracterización adoquines - Propiedades físicas y mecánicas

En lo que respecta a la dureza superficial, se nota una leve reducción en comparación con la muestra de referencia con relación a esta característica presente en los adoquines. Esta disminución es claramente atribuible a la presencia de residuos en las superficies externas de los prefabricados, lo que resulta en una menor resistencia a la penetración desde el exterior. Es importante destacar que esta pérdida es de escasa relevancia.

Los valores que presentan las muestras en la resistencia a la rotura son semejantes a los de la muestra de referencia, manteniéndose por encima en todos los casos de los valores mínimos requeridos por la normativa de aplicación como se muestra en la Tabla 6.2.

Como se muestra en la Tabla 6.2, todos los valores de la resistencia a rotura superan el valor mínimo establecido en la norma de 3,6 MPa, encontrándose la mayor diferencia entre la muestra de referencia (P10A) y el prefabricado con adición del 60% del residuo (60PUS10A), coincidiendo esta valoración con lo resultante en los valores de carga a rotura, manteniéndose todos los valores por encima del umbral de 250N/mm establecido en la normativa. Se observa incluso una mejoría en los resultados con la menor cantidad de sustitución del árido.

Respecto a la resistencia a compresión tras someter las muestras al ensayo de hielo-deshielo los resultados tras la prueba dan valores superiores a los iniciales, mejorados en todas las dosis tal como muestra la Tabla 6.3 y la Figura 6.5, y siempre cumpliendo con la norma ya que nunca es inferior a 3,6 MPa.

Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos tras el ensayo de cristalización salina se pueden observar cómo, al igual que en el caso anterior, las resistencias mecánicas son superiores a las obtenidas inicialmente. El resultado obtenido en la dosificación de reposición al 40%, aumenta hasta 7,7 MPa. Este resultado se debe probablemente al efecto del aditivo, que, al combinarse con el residuo, compacta la matriz de tal manera que su valor de resistencia mejora notablemente, obteniéndose resultados muy satisfactorios.

	Muestra	Resistencia a Compresión (MPa)	Resistencia mecánica después de los ciclos de hielo/deshielo (MPa)	Resistencia mecánica después de la cristalización de sales (MPa)
Referencia	P10A	4,8	6,5	5,3
Adoquines	20PUS10A	5,1	6,1	5,6
	40PUS10A	4,3	6,2	7,7
	60PUS10A	3,8	4,4	5,1
Requerimiento mínimo		3,6	3,6	3,6

Tabla 6.3 Resistencia a compresión después de ensayos durabilidad

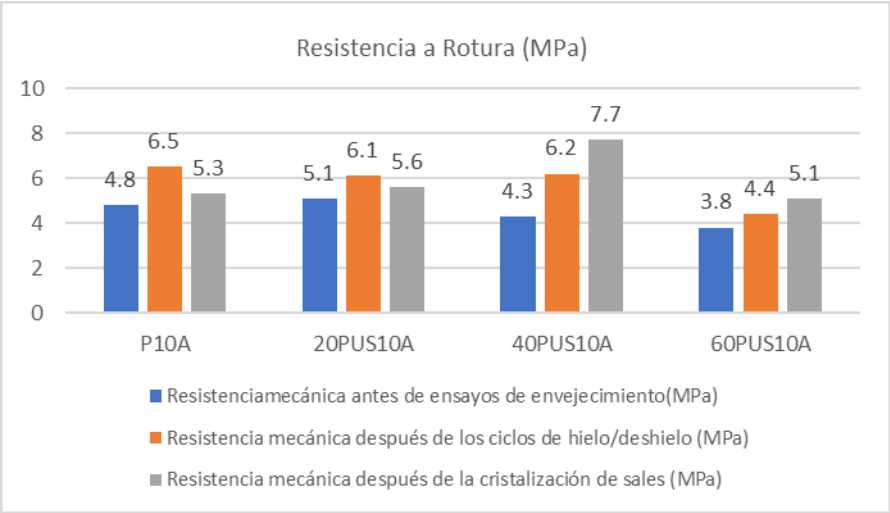


Figura 6.5 Comparativa resistencias a compresión después de ensayos de durabilidad

En cuanto al comportamiento que presentan cada una de las dosificaciones a las actuaciones externas propias de su uso, se muestran en la siguiente Tabla 6.4 en función de porcentaje de residuo empleado.

	Muestra	Absorción del agua (%)	Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	Resistencia al deslizamiento/resbalamiento (USRV)	Comportamiento frente al fuego
Referencia	P10A	4,50	14	62	A1
Adoquines	20PUS10A	5,20	14	56	A1
	40PUS10A	5,90	16	59	A1
	60PUS10A	7,60	17	60	A1
	Requerimiento mínimo	≤ 6	≤ 23	≥ 45	A1

Tabla 6.4 Resultados propiedades físicas y mecánicas

En los parámetros analizados, se observa una ligera reducción de forma general en todos los valores con respecto al adoquín de referencia y de forma proporcional al aumento del porcentaje de sustitución, manteniéndose en todos los casos cerca de los valores sin incorporación de residuo.

Todos los parámetros obtenidos en cuanto a la absorción del agua son crecientes según se incrementa el porcentaje de sustitución, manteniéndose en valores inferiores a los limitados por la normativa salvo en el caso de los prefabricados con adición del 60%, que superan esos valores máximos indicados. Al superar el 50% de inclusión, las características que presenta el residuo de

poliuretano hacen que el conjunto de la mezcla absorba una cantidad superior de agua durante el proceso de elaboración y fraguado.

Respecto al comportamiento frente al fuego todas las muestras han sido clasificadas como “A1”, el más alto nivel de resistencia al fuego según la norma¹¹⁸. Dentro de este contexto, la designación "A1" denota que el adoquín muestra características no combustibles y carece de contribución a la propagación del fuego, además de no generar humos ni partículas inflamables durante eventos de incendio.

Sin embargo, en el ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, se recogen unos datos mejorados de los requerimientos exigidos por la norma, superando todas las dosificaciones este ensayo, con valores semejantes o muy próximos a los obtenidos en las muestras de referencia, siendo un aspecto importante y a tener en cuenta de cara a su utilización, ya que estos prefabricados por su uso, pueden estar expuestos de manera continuada a un rozamiento externo que provoque un envejecimiento acelerado. Este ligero empeoramiento al aumentar el porcentaje de sustitución es debido a la existencia en la superficie del adoquín de fracciones del residuo, que presentan unas menores resistencias frente a un desgaste directo.

6.3 CONCLUSIONES DE LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES

En función de los parámetros resultantes en cada uno de los ensayos realizados y estipulados por la normativa de aplicación sobre los adoquines prefabricados con inclusión de residuos de poliuretano procedentes de techos de vehículos triturados en detrimento de parte del árido, se puede determinar que por lo general todas las dosificaciones realizadas cumplen con los valores mínimos exigidos, incluso mejorando las características en ciertas propiedades en comparación con los adoquines de referencia tradicionales.

La incorporación del residuo no afecta a los aspectos visuales ni a la forma o dimensiones que presentan los nuevos prefabricados, observándose una planeidad en todas sus caras con una cierta rugosidad propia de estos productos. Tampoco son apreciables eflorescencias ni genera la aparición de fisuras o defectos en sus caras.

Los porcentajes de sustitución adecuados para la fabricación de estas piezas no deben exceder el 60%, ya que, en estudios previos, se ha observado con cantidades superiores a esta que las piezas pierden su idoneidad en cuanto a

¹¹⁸UNE-EN 13501:2019. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación.

dimensiones y planeidad, así como en otras propiedades, invalidando estos elementos para su comercialización.

Estas dosificaciones reducen la densidad de las muestras en comparación con los elementos tradicionales, siendo el peso de estos indirectamente proporcional al porcentaje de sustitución por residuo. La mejora es significativa ya que reduce los esfuerzos y recursos necesarios para su tratamiento, empaquetado, transporte y puesta en obra.

Por otro lado, se observa una ligera reducción de la dureza superficial y de la resistencia al desgaste por abrasión, pero siempre cumpliendo los parámetros mínimos exigidos y siendo cercanos a los obtenidos en las muestras de referencia. Esta pequeña variación puede justificarse debido a la presencia de partículas de poliuretano en la superficie de las caras, con menor resistencia al desgaste directo en comparación a otras materias primas, pero con unos valores suficientes para cumplir sus funciones de uso y durabilidad.

A menor sustitución se produce una mejora en las resistencias a compresión y carga de rotura en comparación con el adoquín tradicional. Esta mejora puede deberse a la inclusión de las partículas de poliuretano, cuya mayor flexibilidad favorece la resistencia, y refuerza la cohesión de la mezcla. Superado el umbral del 20% de reemplazo, disminuyen la resistencia a la compresión y carga de rotura, pero manteniéndose estos próximos a los valores de referencia y siendo superiores a los umbrales mínimos exigidos por la normativa¹¹⁹.

Por el contrario, la absorción de agua incrementa progresivamente de manera proporcional al porcentaje de residuo de poliuretano, alcanzando su valor más elevado en la dosificación correspondiente al 60%, donde se superan los valores máximos permitidos por norma.¹²⁰ Esta desviación se debe a la mayor cantidad de agua que es capaz de absorber el residuo de poliuretano, siendo superior al del resto de materias primas que componen el prefabricado.

Estos análisis demuestran que la fabricación y utilización de los nuevos adoquines es perfectamente viable en solados de obras de construcción e ingeniería civil siendo las mejores dosificaciones las que contienen el 40% y el 20% de sustitución, destacando este último valor, pues supone mejoras con respecto a las muestras de referencia. Las muestras con el 60% de incorporación de residuo cumplen con todos los requisitos, salvo el ensayo de absorción de agua, quedándose cercano a los valores exigidos.

¹¹⁹UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

¹²⁰UNE-EN 12738:2022. Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón.

Capítulo

07

**Bloques de cemento
aligerados con
residuos
industriales de
poliuretano**

7 BLOQUES DE CEMENTO ALIGERADOS CON RESIDUOS INDUSTRIALES DE POLIURETANO

7.1 PROCESO DE ELABORACIÓN

Los bloques se han fabricado con una dosificación de 1:3 en peso de cemento en relación al árido, considerando el árido como la adición de arena más el residuo polimérico.

La adición de residuos poliméricos al producto prefabricado supone una reducción de peso de hasta el 70%, además de mejorar sus características físicas. El agua se añade en cantidad suficiente para garantizar una buena trabajabilidad y un estado plástico en las mezclas, de acuerdo con la normativa estándar EN 1015-3,¹²¹ en la cual se establecen los métodos de ensayo para la determinación de la consistencia de morteros frescos y se definen los procedimientos específicos para evaluar las capacidades de los morteros y la segregación de sus componentes.

Para su elaboración se mezclan, por un lado, el poliuretano triturado, con el cemento y los áridos y, por otro, el agua y el aditivo. Se amasan en la hormigonera y luego se colocan en los moldes, donde se vibran en la mesa vibradora (Figura 7.1).



Figura 7.1 Proceso de mezclado y vibrado de los bloques

¹²¹UNE-EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

Tras pasar por el proceso de vibrado, los bloques se compactan manualmente, a diferencia del proceso de fabricación de los adoquines.

Se han obtenido diferentes dosificaciones con el fin de realizar un estudio comparativo. La primera dosificación es de referencia sin reponer el árido y sin aditivo, y para las otras se sustituye el 25% ,50%, 75% y el 100% del árido por residuo polimérico, con los dos tipos diferentes de aditivos: el S1, relativamente hidrófilo y el S2, menos hidrófilo. Las propiedades se midieron en estado fresco, realizando los ensayos de acuerdo con la legislación y requisitos vigentes.¹²²



Figura 7.2 Aspecto general bloque

7.1.1 Dosificaciones

Como se ha comentado anteriormente, la dosificación utilizada para su fabricación es de 1:3 considerando el árido como la adición de arena más el residuo polimérico (Tabla 7.1).

	Muestra	Cemento (kg)	Árido (kg)	Residuo de poliuretano (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)
Referencia		1,200	3,600	-	0,67	-
Bloques con S1	25PUS1B	1,100	2,475	0,046	0,69	0,011
	50PUS1B	1,200	1,800	0,100	0,82	0,012
	75PUS1B	1,300	0,975	0,162	1,00	0,013
	100PUS1B	1,400	-	0,233	1,36	0,014
Bloques con S2	25PUS2B	1,000	2,250	0,042	0,47	0,010
	50PUS2B	1,000	1,500	0,083	0,52	0,010
	75PUS2B	1,000	0,875	0,137	0,63	0,011
	100PUS2B	1,000	-	0,233	1,01	0,014

Tabla 7.1 Dosificación bloques

¹²²UNE-EN ISO 1182:2021. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.



Figura 7.2 Aspecto de uno de los bloques

7.2 CARACTERIZACIÓN

Se han llevado a cabo diferentes evaluaciones y ensayos ya descritos en el Capítulo 4, como la revisión de aspectos visuales, densidad aparente, resistencia a la flexión y compresión, permeabilidad y absorción de agua para caracterizar los bloques.

Los resultados del ensayo de densidad aparente se muestran a continuación.

	Muestra	Peso (kg)	Densidad (kg/m³)
Referencia		7,643	2193,0
Bloques con S1	25PUS1B	6,830	1987,9
	50PUS1B	6,327	1870,9
	75PUS1B	5,483	1633,6
	100PUS1B	4,270	1277,4
Bloques con S2	25PUS2B	5,117	1509,1
	50PUS2B	4,669	1375,6
	75PUS2B	4,291	1273,9
	100PUS2B	2,929	876,4

Tabla 7.2 Densidad aparente bloques

En cuanto a las propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 7.3 los resultados de Rotura Y Resistencia a compresión.

La resistencia a la compresión de los bloques mezclados con tensioactivo S2 fueron inferiores a las de la muestra de referencia.

	Muestra	Rotura (KN)	Resistencia a Compresión (MPa)
Referencia		435,8	25,1
Bloques con S1	25PUS1B	383,7	22,3
	50PUS1B	298,8	17,6
	75PUS1B	224,3	13,2
	100PUS1B	157,2	9,3
Bloques con S2	25PUS2B	99,7	5,9
	50PUS2B	59,0	3,5
	75PUS2B	103,2	6,1
	100PUS2B	35,3	2,1

Tabla 7.3 Resistencia a compresión

Con respecto al mortero de referencia, las resistencias a compresión dan los 28 días para el aditivo S1 en todas las sustituciones de arena por residuos disminuyen entre un 11% y un 47%, respectivamente para las muestras, y para las muestras con sustitución completa de polímero por arena las resistencias de las muestras se reducen hasta un 63%. Con el aditivo S2 la resistencia a compresión disminuye de forma drástica reduciéndose entre un 70% y un 92% tras la sustitución del 100% de la arena por el poliuretano triturado.

En lo que respecta a la absorción se mide el coeficiente de capilaridad y el coeficiente de absorción de agua por capilaridad según normativa,¹²³ en la Tabla 7.4 se presentan los resultados del ensayo explicado en el capítulo 4:

	Muestra	PESO SECO (g)	PESO 10 MIN. (g)	ABS. CAPILARIDAD (g/m ² .s)	PESO SATURADO (g)	ABS. TOTAL (%)
Referencia	Ref.	7036,00	7053,95	1,76	7472,65	6,21
Bloques con S1	25PUS1B	6506,55	36021,05	1,42	7106,85	9,23
	50PUS1B	5868,45	5889,65	2,105	6669,4	13,66
	75PUS1B	4888,7	4915,95	2,705	5968,2	22,08
	100PUS1B	3483,25	3542,00	5,62	4924,55	41,38
Bloques con S2	25PUS2B	4744,75	4906,80	16,085	5723,4	20,67
	50PUS2B	4301,75	4389,05	8,555	5356	24,69
	75PUS2B	3924,05	3974,75	4,985	4987,55	27,13
	100PUS2B	2592,95	2661,80	6,84	3873,55	49,40

Tabla 7.4 Resultados ensayo absorción de agua

¹²³UNE-EN 1015-18:2003. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

La adición de residuos poliméricos supone una reducción de peso saturado de hasta el 70%, además de mejorar sus características físicas con respecto a los valores de referencia. La densidad disminuye con la cantidad de árido sustituido por residuos, obteniéndose bloques ligeros, pero al mismo tiempo las propiedades estructurales y la trabajabilidad son suficientes para la posible colocación en obra.

La absorción de agua en los bloques revela que la porosidad abierta es más pronunciada en aquellas mezclas con mayores cantidades de residuos poliméricos. Esto conduce a una mayor succión de agua a través de los poros del bloque. La porosidad abierta, indicativa de la estructura interna de los materiales, aumenta significativamente cuando se incorporan mayores proporciones de residuos poliméricos.

Esto no solo se limita al aumento de la porosidad, sino que también está vinculado a la naturaleza química de los poros. Los polímeros, así como los aditivos utilizados (en especial el S1), al ser hidrofóbicos, alteran la afinidad del bloque por el agua, intensificando la succión.

La altura alcanzada por el agua lleva a suponer que se forma una fina red capilar con muchos poros interconectados, por lo que el agua sube con facilidad, debido a las fuerzas de capilaridad.

En cuanto a la absorción de agua por capilaridad, los morteros presentan también altos coeficientes y, en consecuencia, la altura de penetración del agua dentro del mortero es muy elevada. Estos resultados implican que la consolidación de su red capilar intersticial también fue mayor debido a la incorporación de residuos.¹²⁴

Cuanto mayor sea el valor de HLB (en S1 6.1 y en S2 12.1), más hidrófila será la molécula del aditivo y más fuerte será el efecto potenciador de la ligereza. De esta forma, las resistencias mecánicas de las muestras fluctúan considerablemente en función del grado de hidrofilia del aditivo empleado.

Estos resultados mostraron la misma tendencia de la tasa de absorción de agua y la razón podría ser la causa del mayor crecimiento de las relaciones capilares, lo que produce un aumento consecuente de la porosidad del mortero de cemento.

Los resultados del ensayo de permeabilidad al vapor de agua ejecutados en los bloques se muestran en la Tabla 7.5.

¹²⁴ I Santamaría-Vicario, L. Alameda Cuenca-Romero, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, A. Rodríguez. "Design and Characterization of Gypsum Mortars Dosed with Polyurethane Foam Waste PFW" (2020) from <https://doi.org/10.3390/ma13071497>

	Muestra	Permeanza (Kg/m ² ·s·Pa)	Permeabilidad (Kg/m·s·Pax)	μ
Referencia	Ref.	1,27269E-08	2,03631E-10	1
Bloques con S1	25PUS1B	4,8858E-09	7,81728E-11	3
	50PUS1B	3,42298E-09	5,47677E-11	4
	75PUS1B	4,54216E-09	7,26746E-11	3
	100PUS1B	3,73436E-09	5,97498E-11	3
Bloques con S2	25PUS2B	2,01224E-09	3,21958E-11	6
	50PUS2B	2,67999E-09	4,28799E-11	5
	75PUS2B	3,51058E-09	5,61693E-11	4
	100PUS2B	3,87746E-09	6,20394E-11	3

Tabla 7.5 Resultados Permeabilidad al vapor de agua

Siguiendo los criterios de norma UNE-EN 13501-1:2009¹²⁵ los productos de construcción se pueden clasificar según su comportamiento al fuego. Para ello, primero ejecutamos el ensayo UNE-EN ISO 1182¹²⁶ para productos homogéneos cuyos resultados pueden comprobarse en la Tabla 7.6.

Fecha	DOSIFICACIÓN	Incremento Tª horno (Δt) (°C)	Persistencia de la inflamación (tf) (s)	Pérdida de masa (Δm) (%)	Clasificación
13/05/2024	REF	10.5	0	7.22	A1
8/5/2024	25PUS1B	4.8	193	9.77	
8/5/2024	50PUS1B	7.2	375	11.97	
9/5/2024	75PUS1B	37.5	575	18.48	
26/05/2023	100PUS1B	APAGADO	946	26	

Tabla 7.6 Resultados Permeabilidad al vapor de agua

Según normativa, en la clase A1 no debe haber inflamación persistente ni llamas visibles durante el ensayo. Conjuntamente, el incremento máximo de temperatura permitido es ≤ 30 °C, la pérdida de masa debe ser $\leq 50\%$ y la liberación de calor debe ser insignificante. Para la clase A2, se permite un tiempo limitado de inflamación o llamas visibles, siempre que cumpla con valores específicos.

¹²⁵UNE-EN 13501-1:2009 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación.

¹²⁶UNE-EN ISO 1182:2021. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.

Como el tiempo de persistencia de la inflamación es mayor del que marca la normativa, se realiza el ensayo conforme a la ISO 1716,¹²⁷ complementado con los criterios de la UNE-EN 13823¹²⁸ para la clasificación de materiales según la clasificación de la norma mencionados anteriormente. Para la dosificación de sustitución 25PU, se obtuvo un potencial calorífico de 0,168 MJ/kg, valor significativamente inferior al límite de 3 MJ/kg establecido para materiales homogéneos.

Estos resultados indican que el material cumple con los requisitos iniciales para su clasificación como de bajo potencial calorífico. Aunque el ensayo proporciona un resultado orientativo, es un indicador positivo para avanzar en su caracterización completa bajo las normativas aplicables.

7.3 CONCLUSIONES DE LA FABRICACIÓN DE BLOQUES

Tras los ensayos realizados se revelan una serie de consideraciones fundamentales en relación con su idoneidad y desempeño en aplicaciones constructivas.

En lo que respecta a los aspectos visuales, la evaluación superficial demostró la ausencia de imperfecciones estructurales tales como fisuras o desprendimientos. Aunque se toleran defectos como pequeñas grietas o exfoliaciones, la presencia de estas imperfecciones no parece tener un impacto negativo visible en el funcionamiento efectivo de los bloques.

En cuanto a la densidad aparente, el reemplazo de la arena por residuos poliméricos es un factor determinante directo de este parámetro. Los resultados indican una disminución gradual en la densidad aparente a medida que aumenta la proporción de residuos, lo que resulta en bloques más livianos. Aunque esta reducción es prometedora para aplicaciones que requieren materiales ligeros, también implica una posible disminución en las propiedades mecánicas

En términos de resistencia a la compresión, se observa una reducción en la resistencia para los bloques que contienen residuos poliméricos, especialmente cuando se utiliza el aditivo S2. Esto sugiere una relación directa entre la proporción de residuos y la resistencia mecánica, lo que resalta la importancia de

¹²⁷UNE-EN ISO 1716:2021 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del poder calorífico superior (valor calorífico)

¹²⁸UNE-EN 13823:2021 Ensayos de reacción al fuego de productos de construcción. Productos de construcción, excluyendo revestimientos de suelos, expuestos al ataque térmico provocado por un único objeto ardiendo.

encontrar un equilibrio entre la sostenibilidad de las muestras y su capacidad estructural en el diseño y aplicación.

Los resultados de los ensayos de absorción de agua y capilaridad proporcionan una visión importante sobre cómo la adición de residuos afecta la porosidad y la capacidad de los bloques para absorber agua. A pesar de que el peso saturado disminuye, la porosidad abierta aumenta, lo que afecta directamente la profundidad a la que el agua puede penetrar en los bloques. Este fenómeno está relacionado con la naturaleza hidrofóbica de los polímeros y aditivos utilizados, lo que influye en la afinidad del bloque por el agua y en la formación de una red capilar interconectada.

Respecto a la permeabilidad al vapor de agua, se evidencia una disminución en este parámetro con la incorporación de poliuretano, indicando una mejora en la capacidad de los bloques para resistir el flujo de agua. Este resultado presenta una particular importancia en términos de resistencia a la humedad y su potencial impacto en aplicaciones constructivas a largo plazo.

En resumen, se subraya la importancia de adoptar un enfoque equilibrado en la implementación de bloques, requiriendo una evaluación de la proporción de residuos y tipo de aditivo a incorporar con el objetivo de maximizar la sostenibilidad sin comprometer la integridad estructural. Las mejoras notables, especialmente en términos de peso, capacidad de absorción de agua y permeabilidad, sugieren un prometedor potencial para aplicaciones sostenibles ser empleados como morteros prefabricados en el ámbito de la construcción.

Capítulo

08

**Análisis del
ciclo de vida**

8 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se evalúa el impacto ambiental que producen los adoquines y bloques de estudio elaborados con cemento Portland, arena, agua y residuos triturados de poliuretano. Las propiedades químicas de los morteros se han modificado con aditivos tensioactivos no iónicos que producen una mejora en las resistencias mecánicas, obteniendo morteros de densidades más bajas con buenas propiedades en cuanto a trabajabilidad, compactación de la matriz, menor desagregación de las partículas y con resistencia térmica y durabilidad frente al fuego.

El propósito y la extensión de este estudio radican en verificar y comprender en qué medida la sustitución parcial o total de los áridos por residuos de poliuretano conduce a una mejora del desempeño ambiental de dichos productos.

8.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Con los resultados obtenidos y explicados en capítulos anteriores se ha realizado una evaluación del impacto del uso de estos residuos en diferentes impactos ambientales, con el fin de considerarlos como una alternativa a los materiales utilizados actualmente, considerándolos como parte de una economía circular.

Para ello, se realiza una evaluación que considera los flujos de entrada y salida en cada etapa, tanto en algunas de las fases como la producción, o en todas ellas.^{129 130} En este caso, se ha realizado en la fase de producción de los productos, desde que se suministran las materias primas al laboratorio para la fabricación de los bloques, hasta el final del proceso de fabricación cuando ya están listos para ser almacenados o transportados, esto se ha realizado así porque se consideró que es en esta etapa donde la sustitución de parte o la

¹²⁹Science Direct. A. Rodrigo-Bravo, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González. "Evaluación comparativa del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) entre losas de yeso para cielo raso estándar y losetas para cielo raso de yeso de poliuretano. Energía y Edificación." (2022) from <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867>

¹³⁰Science Direct. MA Pedreño-Rojas, J. Fort, R. Cerny, P. Rubio-de-Hita. "Evaluación del ciclo de vida de la producción de yeso natural y reciclado en el contexto español" (2020) from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>

totalidad de los áridos por residuos tiene un mayor impacto. El resto del proceso sigue siendo el mismo para todas las dosificaciones.

8.2.1 Alcances

El alcance general es de la cuna a la puerta, incluye las tres primeras etapas de la fase de fabricación de producto descritas en la Figura 8.1.

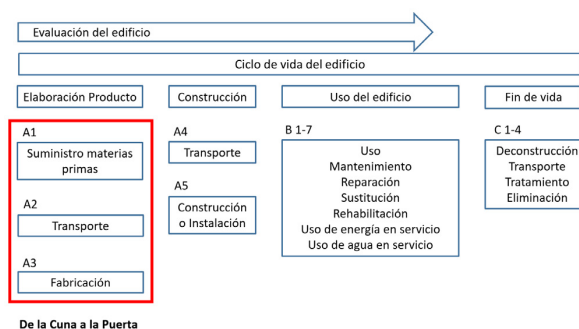


Figura 8.1 Límite del sistema: de la cuna a la puerta

La primera etapa, comprende el suministro de las materias primas necesarias, el transporte y la fabricación del producto, y los procesos asociados al mismo como su empaquetado. En este estudio, se excluyen la fase de construcción (formada por el transporte a obra, que sí, que se ha evaluado y su instalación) la fase de uso y fase de fin de vida, ya que se asume que los tres tipos de bloques bajo estudio tienen el mismo proceso de construcción en obra, uso y final de vida (Figura 8.1).¹³¹

8.2.2 Fases

El estudio de este Análisis de Ciclo de Vida incluye las cuatro fases previstas: definición del objeto y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto ambiental y finalmente la fase de interpretación. Estas fases han sido evaluadas para comparar los resultados con estudios LCA similares. (Figura 8.2)

¹³¹Informes de la Construcción. M. Madrid, Y. García Frómeta, J. Cuadrado, A. Rodríguez, JM. Blanco. "Análisis de ciclo de vida en bloques de hormigón: comparación del impacto producido entre bloques tradicionales y con subproductos." (2022) from <https://doi.org/10.3989/ic.88125>

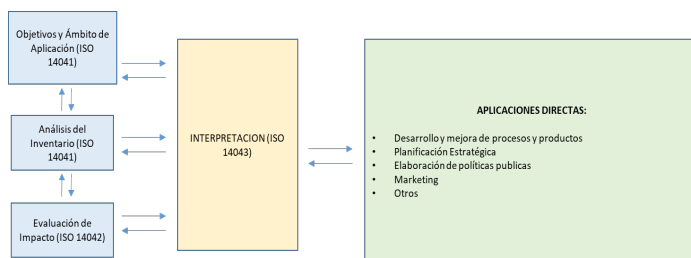


Figura 8.2 Etapas de un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

En cada una de las fases del ACV se ha seguido la correspondiente norma:

- ISO 14041¹³²: Esta norma se centra en los aspectos relacionados con el objetivo y el alcance de la evaluación del ciclo de vida. Proporciona directrices detalladas sobre cómo establecer el alcance y los límites del ACV, definir los objetivos y el propósito de la evaluación, y cómo comunicar los resultados.
- ISO 14042¹³³: Esta norma se enfoca en la fase de inventario del ciclo de vida (LCI). Proporciona directrices específicas sobre cómo recopilar y compilar datos sobre las entradas y salidas de materiales, energía y otros recursos durante todas las etapas del ciclo de vida del producto, servicio o proceso evaluado.
- ISO 14043¹³⁴: Esta norma se centra en la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA). Proporciona directrices sobre cómo evaluar los impactos potenciales del ciclo de vida en diversas categorías de impacto ambiental, como el cambio climático, la acidificación, la eutrofización, etc. Ayuda a interpretar los datos del inventario y a entender las implicaciones ambientales de las actividades evaluadas.

En todo el proceso se ha seguido lo descrito en la norma ISO 14040,¹³⁵ que proporciona las directrices generales y requisitos para llevar a cabo la evaluación del ciclo de vida (ACV).

¹³²UNE-EN ISO 14041. Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario.

¹³³UNE-EN ISO 14042. Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida.

¹³⁴UNE-EN ISO 14043. Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Interpretación del ciclo de vida.

¹³⁵UNE-EN ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

8.2.3 Flujos de referencia y Límite del sistema

Se han realizado varias dosificaciones tanto en los adoquines como en los bloques y las distintas sustituciones de árido por residuos de poliuretano, que se comparará con los valores de referencia.

La unidad funcional seleccionada para la evaluación se ha establecido en 1 metro cuadrado de producto.

Respecto a los límites del sistema utilizado, se ha llevado a cabo una evaluación del sistema durante la fase de fabricación de los productos, la cual se considera crítica en el proceso, y se compararán las distintas dosificaciones mencionadas.

El inventario de ciclo de vida (LCI) es el descrito en la norma ISO 14040¹³⁶ que incluye la toma de datos con las entradas y salidas correspondientes, así como su cálculo mediante el software SIMAPRO. Este inventario considera todos los procesos unitarios, junto con los flujos elementales y de productos.

La Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA) tiene como objetivo cuantificar los impactos ambientales potenciales, utilizando los resultados de la LCI. Para ello, dentro del software utilizado para su evaluación, existen varios métodos para su valoración. En este caso se ha evaluado mediante el método CML-IA basal V3.06/EU25.

Las categorías de impacto evaluadas por unidad funcional son: Potencial de calentamiento global (GWP100a) (kg CO₂ eq), potencial de eutrofización (kg PO₄- -- eq), potencial de acidificación del suelo y agua (kg SO₂ eq), potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) (kg CFC-11 eq), agotamiento de recursos abióticos (ADP - ELEMENTOS) (kg Sb eq), agotamiento de recursos abióticos (ADP - COMBUSTIBLES FÓSILES) (MJ), potencial de oxidación fotoquímica (kg C₂H₄ eq), toxicidad humana (kg 1, 4-DB eq), ecotoxicidad acuática en agua dulce (kg 1,4-DB eq), ecotoxicidad marina acuática (kg 1,4-DB eq) y ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq).

8.2.4 Análisis de impactos evaluados

El análisis del ciclo de vida tanto de los adoquines como de los bloques aligerados con residuo se realizó sobre bloques de referencia, sin residuo ni aditivo, y sobre los prefabricados con sustitución del árido por el residuo.

¹³⁶UNE-EN ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

Se realiza la evaluación del análisis de ciclo de vida en la fase de Fabricación, ya que es el que determina la principal diferencia con respecto al aprovechamiento del residuo frente al prefabricado de referencia. (Figura 8.3)

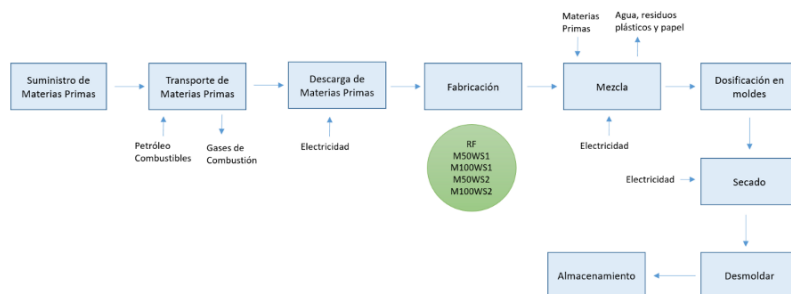


Figura 8.3 Etapas analizadas en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El proceso de fabricación es muy similar en todos los casos, no existiendo diferencias significativas en el proceso de incorporación de residuos respecto a los prefabricados libres de residuos. Solo se añaden residuos y aditivo en lugar de árido, pero se realiza el mismo proceso.

La fase de uso no se ha considerado en este análisis porque no produce ningún impacto, ni sin residuos ni con ellos, dado que los adoquines o bloques se consideran un elemento pasivo en la edificación, no se considera necesario realizar trabajos de mantenimiento o conservación durante la su vida útil.

Se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las diferentes dosificaciones de los prefabricados mediante el programa SIMAPRO, con el método de línea base CML-IA V3.06/EU25. La unidad funcional utilizada igual que en ambos prefabricados ha sido de 1 m².

8.2.5 Categorías de impacto

Las categorías de impacto analizadas han sido:

8.2.5.1 Agotamiento de recursos abióticos

Expresado en kilogramos de antimonio equivalente (kg Sb eq). Esta categoría evalúa el agotamiento de recursos no renovables, específicamente el antimonio equivalente.

8.2.5.2 Agotamiento de recursos abióticos (ADP - COMBUSTIBLES FÓSILES)

Esta categoría evalúa el agotamiento de recursos abióticos relacionados con los combustibles fósiles expresado en megajulios (MJ).

8.2.5.3 *Potencial de calentamiento global*

Esta categoría evalúa la contribución al cambio climático mediante la medición de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) expresada en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq).

8.2.5.4 *Toxicidad humana*

Esta categoría evalúa el impacto en la salud humana, específicamente en términos de toxicidad expresado en kilogramos de equivalente de 1,4-dibromobenceno (1,4-DB eq).

8.2.5.5 *Ecotoxicidad acuática en agua dulce, Ecotoxicidad marina acuática, Ecotoxicidad terrestre*

Se expresan en kilogramos de equivalente de 1,4-dibromobenceno (kg 1,4-DB eq), lo que se traduce en la cantidad de una sustancia en kilogramos, pero ajustada para reflejar su impacto relativo en términos de toxicidad en comparación con el 1,4-dibromobenceno.

Estas categorías evalúan el impacto de los productos en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

8.2.5.6 *Oxidación Fotoquímica*

Expresado en kilogramos de equivalente de etileno (kg C₂H₄ eq) esta categoría mide la capacidad de generar oxidación fotoquímica.

8.2.5.7 *Acidificación del Suelo y Agua*

Esta Categoría se expresa en kilogramos de equivalente de dióxido de azufre (kg SO₂ eq).

8.2.5.8 *Potencial de Eutrofización*

Mide el potencial de eutrofización, es decir, la capacidad de un proceso o producto para aumentar los niveles de nutrientes en los cuerpos de agua se expresa en kilogramos de equivalente de fosfato en (kg PO₄ --- eq).

8.3 ANÁLISIS DE IMPACTO DEL ACV DE LOS ADOQUINES

Se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las diferentes dosificaciones de los adoquines prefabricados.

La unidad funcional utilizada es de 1 m² de adoquín.

Los resultados de cada una de las categorías de impacto analizadas se presentan en la Tabla 8.1.

Categoría de impacto	Unidades	Referencia	20PUS10A	40PUS10A	60PUS10A
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	1,75E-04	1,69E-04	1,58E-04	1,47E-04
Agotamiento de recursos abióticos (ADP - combustibles fósiles)	MJ	147,8274	157,1097	152,2785	147,4473
Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ eq	29,931077	30,114092	29,809155	29,504219
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	1,37E-06	1,36E-06	1,33E-06	1,29E-06
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	6,605	7,089	6,919	6,749
Ecotoxicidad acuática en agua dulce	kg 1,4-DB eq	4,671	4,761	4,664	4,568
Ecotoxicidad marina acuática	kg 1,4-DB eq	9430	9614	9412	9211
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0512	0,0512	0,0507	0,0501
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	0,0026	0,0029	0,0029	0,0028
Acidificación del suelo y agua	kg SO ₂ eq	0,0677	0,0684	0,0671	0,0658
Eutrofización	kg PO ₄ --- eq	0,0203	0,0205	0,0201	0,0198

Tabla 8.1 Resultados ACV adoquines

Al analizar los datos de la Tabla 8.1, se permite una observación detallada de cada una de las categorías de impacto ambiental y sus respectivas variaciones entre las diferentes referencias: Adoquín de Referencia, 20PUS10A, 40PUS10A y 60PUS10A.

A continuación, se procede a realizar un análisis más pormenorizado, excluyendo la redundancia en cuanto a las unidades previamente definidas en el capítulo anterior

- Agotamiento de recursos abióticos: Se observa una reducción gradual en el agotamiento de recursos abióticos a medida que avanzamos de la referencia base (Ref.) a las referencias 20PUS10A, 40PUS10A y 60PUS10A, con valores decrecientes.
- Agotamiento de la capa de ozono: Se aprecia una ligera disminución en el agotamiento de la capa de ozono en las referencias 20PUS10A, 40PUS10A y 60PUS10A en comparación con la referencia base, indicando una posible mejora en este aspecto.
- Toxicidad humana y ecotoxicidad: Los niveles de toxicidad humana y ecotoxicidad presentan variaciones mínimas entre las diferentes

referencias, lo que implica una relativa estabilidad en estas categorías.

- Potencial de calentamiento global: No se observan cambios significativos en el potencial de calentamiento global entre las diferentes referencias, lo que indica que las dosificaciones de sustitución no influyen de manera sustancial en esta categoría de impacto.
- Oxidación fotoquímica, acidificación del suelo y agua, eutrofización: Estas categorías también muestran cambios mínimos entre las diferentes referencias, lo que sugiere una estabilidad relativa en la capacidad de generar impacto ambiental en estas áreas.

En general, las muestras con sustitución de árido por poliuretano reciclado (20PUS10A, 40PUS10A y 60PUS10A) muestran variaciones menores en comparación con la referencia base (Ref.) en términos de agotamiento de recursos abióticos y agotamiento de la capa de ozono, indicando una posible mejora en estos aspectos. No obstante, los niveles de toxicidad humana y ecotoxicidad presentan cambios mínimos.

Además, no se observan cambios significativos en el potencial de calentamiento global entre las diferentes muestras, y las categorías de oxidación fotoquímica, acidificación del suelo y agua, y eutrofización también muestran variaciones mínimas.

8.3.1 Conclusiones

El análisis de impacto del ACV de los adoquines revela resultados significativos sobre el comportamiento ambiental de diferentes dosificaciones de estos productos prefabricados. Se observa una mejora gradual en varias categorías de impacto ambiental al sustituir parte del árido por poliuretano reciclado. Específicamente, se destaca una reducción en el agotamiento de recursos abióticos y una ligera disminución en el agotamiento de la capa de ozono en las muestras con sustitución de poliuretano. Esto sugiere una posible mejora en la sostenibilidad de estos productos y una menor presión sobre los recursos naturales.

A pesar de estas mejoras, los niveles de toxicidad humana y ecotoxicidad muestran cambios mínimos entre las diferentes referencias, lo que indica una relativa estabilidad en estas categorías. Además, no se observan cambios significativos en el potencial de calentamiento global, ni en otras categorías como la oxidación fotoquímica, acidificación del suelo y agua, y eutrofización.

Este análisis sugiere que las dosificaciones de sustitución no influyen de manera sustancial en estas áreas de impacto.

8.4 ANÁLISIS DE IMPACTO DEL ACV DE LOS BLOQUES

De la misma manera que se ha evaluado el impacto ambiental de los adoquines se va a realizar el análisis en la fabricación de los bloques, para cuantificar el impacto de la sustitución de parte del árido natural utilizado en los morteros de cemento por un producto de desecho de poliuretano procedente de la industria de la automoción, comparándolo con los de referencia

Los resultados en cada una de las categorías de impacto analizadas se ven en la Tabla 8.2.

Categoría de impacto	Unidades	Ref.	25PUS1B	50PUS1B	75PUS1B	100PUS1B
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	7,08E-05	6,48E-05	6,63E-05	6,72E-05	6,73E-05
Agotamiento de recursos abióticos (ADP - combustibles fósiles)	MJ	60,4	61,7	66,7	71,06	76,4
Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ eq	12,1	11,3	12,4	13,4	14,5
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	5,62E-07	5,47E-07	5,98E-07	6,49E-07	7,01E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2,740	2,890	3,210	3,540	3,880
Ecotoxicidad acuática en agua dulce	kg 1,4-DB eq	1,990	2,060	2,370	2,700	3,060
Ecotoxicidad marina acuática	kg 1,4-DB eq	3990	4090	4670	5290	5960
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0217	0,0216	0,0249	0,0285	0,0323
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	0,0011	0,0012	0,0013	0,0014	0,0015
Acidificación del suelo y agua	kg SO ₂ eq	0,0279	0,0273	0,0303	0,0334	0,0366
Eutrofización	kg PO ₄ --- eq	0,0083	0,0080	0,0089	0,0097	0,0106

Tabla 8.2 Resultados ACV bloques

El análisis del ACV de los bloques aligerados con residuo se realiza sobre bloques de referencia, sin residuo ni aditivo, y sobre los bloques con sustitución del 25, 50, 75 y 100 % del árido por el residuo, utilizando el aditivo T03=SE más hidrófilo, ya que fue el que mejores propiedades demostró.

Examinando los resultados de la tabla proporcionada, podemos observar detalladamente cada una de las categorías de impacto y cómo varían entre las diferentes dosificaciones: Bloque de Referencia, 25PUS1B, 50PUS1B, 75PUS1B y 100PUS1B. A continuación, se presenta un análisis más exhaustivo:

- Agotamiento de recursos abióticos: Los distintos valores entre las referencias son comparativamente cercanos, con una pequeña reducción gradual al aumentar la cantidad de residuo, lo que sugiere que la incorporación del residuo al producto no afecta significativamente al agotamiento de estos recursos.
- Agotamiento de recursos abióticos (ADP - COMBUSTIBLES FÓSILES): Los resultados muestran un aumento gradual a medida que el porcentaje de sustitución del producto aumenta, lo que indica que a mayor cantidad de poliuretano en la fabricación del bloque se requiere mayores cantidades de energía y recursos no renovables durante su ciclo de vida.
- Potencial de calentamiento global: Se observa un aumento en el potencial de calentamiento global a medida que aumenta el % de sustitución frente al bloque de referencia, lo que sugiere que los bloques aligerados con residuos de poliuretano tienen una huella de carbono más significativa.
- Toxicidad humana: Los valores aumentan gradualmente, lo que indica que los bloques de mayor cantidad de sustitución pueden estar asociados con un mayor riesgo para la salud humana debido a la exposición a sustancias tóxicas.
- Ecotoxicidad acuática en agua dulce, Ecotoxicidad marina acuática, Ecotoxicidad terrestre: Se observa un aumento en la ecotoxicidad acuática en agua dulce, Marina acuática y terrestre a medida que aumenta la proporción de sustitución en los bloques
- Oxidación fotoquímica: Se observa en los resultados un ligero aumento en la medida que aumenta la proporción de sustitución en los bloques, lo que sugiere un incremento en la producción de compuestos fotoquímicamente activos en la atmósfera.
- Acidificación del suelo y agua: Hay un aumento en la acidificación del suelo y el agua a medida que aumenta la proporción de sustitución en los bloques. Esto indica un incremento en la emisión de compuestos ácidos al medio ambiente.

- **Potencial de eutrofización:** Se observa un aumento en el potencial de eutrofización a medida que aumenta la proporción de sustitución en los bloques, lo que sugiere una mayor carga de nutrientes en los cuerpos de agua.

8.4.1 Conclusiones

El análisis de los bloques aligerados con residuo de poliuretano proporciona una visión detallada de cómo varían las diferentes categorías de impacto ambiental con la sustitución del árido natural. Se observa un aumento gradual en el agotamiento de recursos abióticos y en el potencial de calentamiento global a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Esto sugiere que los bloques con mayor sustitución tienen un mayor impacto ambiental en términos de consumo de recursos y emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, se registra un incremento en la toxicidad humana, la ecotoxicidad y otros impactos ambientales, como la oxidación fotoquímica, acidificación del suelo y agua, y eutrofización, a medida que aumenta la proporción de sustitución en los bloques. Estos resultados destacan la importancia de considerar no solo la eficiencia de los materiales reciclados, sino también su impacto ambiental total en el ciclo de vida del producto.

8.5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Después de analizar los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) tanto de los adoquines como de los bloques, se pueden extraer las siguientes conclusiones generales sobre su impacto ambiental.

En términos de agotamiento de recursos abióticos, se observa una tendencia a la reducción gradual a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de la arena por el poliuretano reciclado. Esto sugiere una potencial mejora en la sostenibilidad de estos productos al disminuir la presión sobre los recursos naturales y disminuir la necesidad de arena.

En cuanto al potencial de calentamiento global, se observan fluctuaciones mínimas lo que indica que la sustitución de árido por poliuretano no tiene un impacto significativo en este aspecto. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los resultados pueden estar influenciados por otros factores, como el proceso de fabricación y la logística asociada.

En relación con la toxicidad humana y la ecotoxicidad, se registran cambios mínimos en ambas muestras, lo que sugiere una relativa estabilidad en estas categorías. Es importante destacar que la incorporación de poliuretano reciclado

puede tener beneficios ambientales potenciales al reducir la toxicidad y la ecotoxicidad en comparación con los materiales convencionales.

Por otro lado, en el caso de los bloques, se observa un aumento en el agotamiento de recursos abióticos y en el potencial de calentamiento global a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución del árido. Esto indica que los bloques con una mayor proporción de poliuretano reciclado pueden tener un impacto ambiental más significativo en términos de consumo de recursos y emisiones de gases de efecto invernadero.

En resumen, si bien la sustitución de árido por poliuretano reciclado puede ofrecer beneficios en términos de reducción del agotamiento de recursos abióticos y agotamiento de la capa de ozono, así como una potencial disminución en la toxicidad y ecotoxicidad, es necesario evaluar cuidadosamente el equilibrio entre estos beneficios y los posibles impactos negativos, como un mayor potencial de calentamiento global y un aumento en la acidificación del suelo y agua.

Se debe considerar también que, aunque no es el objeto de esta investigación el factor determinante en el ACV de estos prefabricados de cemento es el propio cemento empleado en las mezclas, el cual no varía respecto del patrón de referencia, por lo que sustituir el árido en las mezclas, implica que la huella de carbono del mortero con poliuretano reciclado no modifica en exceso el impacto ambiental.

Capítulo

09

**Puesta en obra.
Demostrador**

9 PUESTA EN OBRA. DEMOSTRADOR

9.1 INTRODUCCIÓN

En función de los parámetros resultantes en cada uno de los ensayos realizados y estipulados por la normativa de aplicación sobre los adoquines y bloques con inclusión de diferentes porcentajes de residuos de poliuretano procedentes de techos de vehículos triturados en detrimento de parte del árido, se puede determinar que, por lo general todas las dosificaciones realizadas cumplen con los valores mínimos exigidos, incluso mejorando las características en ciertas propiedades en comparación con el de referencia.

Se aborda este capítulo con la implementación de un demostrador focalizado en la aplicación práctica de los adoquines y bloques en los laboratorios de construcción de la EPS (Universidad de Burgos).

El propósito es examinar exhaustivamente la viabilidad técnica y funcional de estos elementos innovadores en el ámbito de la pavimentación urbana sostenible.

La elección de instalar el demostrador en nuestras instalaciones responde a la necesidad de llevar a cabo un análisis riguroso y controlado, donde se pueda evaluar de manera precisa la respuesta de los prefabricados en condiciones específicas. Este enfoque experimental permitirá una observación detallada de los factores críticos, tales como la resistencia estructural, durabilidad y adaptabilidad a diversas cargas y aspectos meteorológicos.

A través de la instrumentación y monitorización constante de variables clave como la apariencia visual y la dureza Shore C se buscan obtener datos cuantificables que respalden la evaluación. La recopilación y análisis de estos datos contribuirá a una comprensión más profunda de las propiedades mecánicas y físicas de los adoquines y bloques en el contexto específico de las instalaciones.

9.2 PROTOTIPO

Se ha concebido y desarrollado un prototipo sencillo de edificio demostrador, caracterizado por una estructura de ejecución sencilla y diseñado específicamente para analizar el comportamiento de las muestras en las instalaciones (Figura 9.1). Este proyecto responde a la necesidad de evaluar de manera sistemática y científica la eficacia y aplicabilidad de los adoquines y bloques en entornos contruidos.

El diseño del prototipo se ha fundamentado en principios básicos, priorizando la simplicidad y el modularidad.

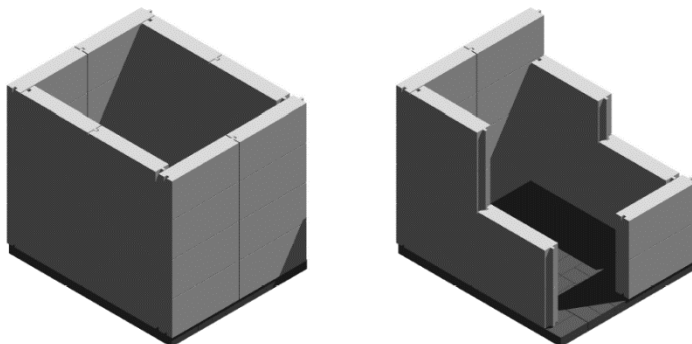


Figura 9.1 Prototipo demostrador. Diseño ejecutado con Sketchup (Trimble Inc.)

La estructura presenta una configuración que permite la fácil integración y disposición de las diferentes muestras con sustitución de poliuretano de los adoquines y bloques, así como de las muestras de referencia, estableciendo un entorno controlado para analizar su desempeño en condiciones específicas.

Previo a la implementación del prototipo en las instalaciones de la universidad, se ha planificado un programa de análisis experimental. Este programa abarcará la evaluación de la dureza Shore C y el deterioro visual de los prefabricados en las diferentes situaciones tras el paso del tiempo y los fenómenos meteorológicos.

La singularidad de este prototipo no solo radica en su utilidad como herramienta de investigación, sino también en su capacidad para proporcionar información valiosa sobre la implementación práctica de cada dosificación respecto a la de referencia en contextos urbanos.

En la Figura 9.2 puede verse la distribución del demostrador y ubicación de cada tipo de muestra en la instalación.

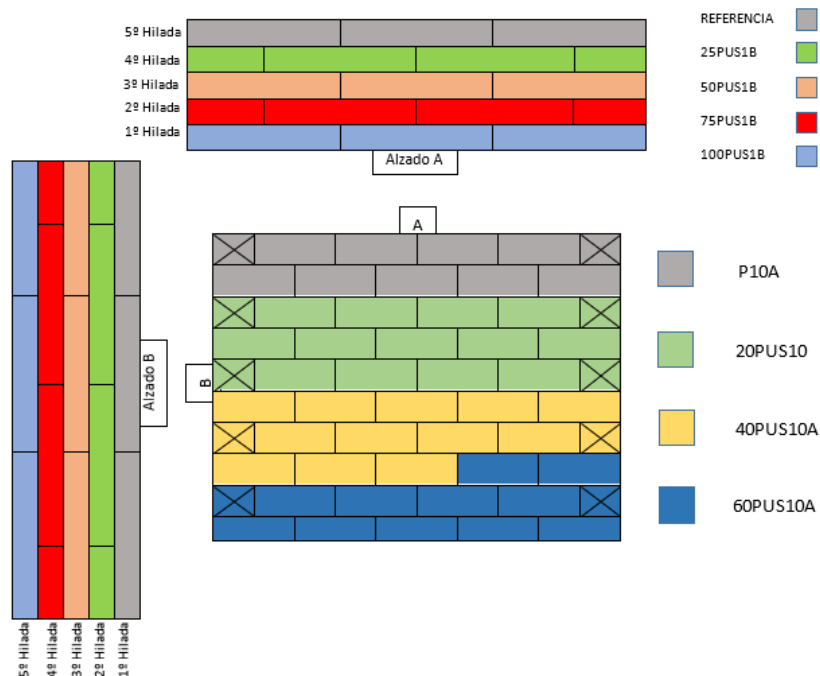


Figura 9.2 Distribución de piezas en el demostrador. Alzado B (izq.); Alzado A (centro sup.); planta (centro inferior)

9.3 EJECUCIÓN. PUESTA EN OBRA

El prototipo previamente diseñado ha sido implementado y construido en el área exterior de los laboratorios de materiales.

En la paramenta, se ha implementado la disposición de bloques, llevada a cabo en julio de 2023. Posteriormente, en septiembre de 2023, se procedió a la instalación de adoquines en el pavimento.

Esta construcción en un entorno real responde a la necesidad de someter el prototipo a condiciones ambientales y de carga que simulan de manera más fidedigna las demandas del mundo real.

La ejecución del prototipo ha involucrado la utilización de las diferentes muestras de adoquines y bloques con las diferentes dosificaciones analizadas en esta Tesis permitiendo así un análisis exhaustivo de su rendimiento en diversas configuraciones.

En la Figura 9.3 se puede ver la ejecución del demostrador con los bloques en el paramento, y los adoquines como pavimento (Figuras A, B).



Figura 9.3 Proceso de ejecución del demostrador (julio 2023)

9.4 EVOLUCIÓN Y RESULTADOS

9.4.1 Aspectos visuales

Para el seguimiento y análisis de la evolución de las muestras en el demostrador se han ido fotografiando y tomando datos durante distintos días y en diferentes condiciones climatológicas. Se ha hecho seguimiento de este demostrador desde septiembre de 2023 hasta la entrega de este trabajo, dejando para futuras investigaciones la evolución en el tiempo

En las Figuras 9.4, 9.5 y 9.6 se puede observar el detalle del aspecto visual en fotografías tomadas en diferentes días bajo distintas condiciones climáticas.



Figura 9.4 Evolución aspectos visuales en diferentes condiciones climáticas



Figura 9.5 Evolución aspectos visuales en diferentes condiciones climáticas



Figura 9.6 Evolución aspectos visuales en diferentes condiciones climáticas

La recogida sistemática de datos a lo largo de todo un año se ha recopilado y recogido en el Anexo a esta Tesis Doctoral, donde se muestra la variación temporal de aspecto visual con fotografías realizadas cada 15 días.

9.4.2 Dureza Shore C

Con el propósito de evaluar los efectos físicos derivados de la incorporación del residuo en las mezclas con diversas proporciones en el demostrador, se procede a cuantificar la dureza superficial *Shore C* de cada muestra mediante el empleo de un durómetro correspondiente tal como se explica en el capítulo 4. Este enfoque proporciona información precisa sobre las variaciones en la dureza, permitiendo una evaluación científica de la influencia del residuo en las propiedades físicas de las mezclas. Estos datos contribuirán a una comprensión más profunda de las implicaciones de la inclusión del residuo en el contexto de las características de dureza superficial del material evaluado.

Los resultados de las mediciones de dureza *Shore C* correspondientes a los adoquines y bloques se muestran en la Tabla 9.1 y la Tabla 9.2, respectivamente.

CAPÍTULO 9

FECHA	REF P10A	20PUS10 A	40PUS10 A	60PUS10 A	Tª	Comentarios
ANTES DE COLOCACIÓN	93,1	90,3	85,7	84,6		
9/4/2023	86,6	90,2	86,6	83,4	24°C	SOL
9/18/2023	91,4	89,3	87,2	90,6	18°C	HUMEDOS/LLU VIA
10/2/2023	90,7	92,7	92,6	87,8	26°C	SOL
10/16/2023	88,5	91,5	86,0	87,0	15°C	LLUVIA
10/30/2023	90,7	86,4	85,4	81,7	11°C	HUMEDOS/LLU VIA
11/13/2023	88,5	92,4	89,6	87,6	15°C	HUMEDOS/LLU VIA
11/27/2023	93,3	93,1	89,7	88,5	7°C	HUMEDOS/LLU VIA
12/11/2023	93,5	92,0	89,2	86,9	11°C	HÚMEDOS/LLU VIA
12/22/2023	91,9	92,0	89,8	88,3	6°C	DÍAS CON Tª<0°C
1/8/2024	92	92,3	88,7	86,6	1°C	DÍAS CON Tª<0°C
1/22/2024	92,1	93,2	89,8	85,7	8°C	HUMEDOS
2/5/2024	93,1	93,7	93,5	90,9	9°C	
2/19/2024	93,3	91,0	87,8	86	12°C	
3/4/2024	90,8	92,1	87	84,4	8°C	NEVADA FINDE SEMANA/LLUVI A DÍA
3/18/2024	94,7	94,0	89,1	84,7	18°C	SOLEADO/SIN HELADAS
4/1/2024	93,1	92,0	88,2	87,3	7°C	
4/15/2024	92,7	92,7	89,2	88	13°C	DÍAS DE CALOR
4/30/2024	93	90,7	87,9	87,6	13°C	
5/13/2024	89	86,7	86,9	83,5	19°C	
5/27/2024	94,8	91,4	90,1	88,9	13°C	
6/10/2024	94,4	91,9	90,3	87,8	13°C	
6/24/2024	93,7	92,2	91,7	89,8	19°C	
7/8/2024	93,9	93,2	92	90,5	25°C	
7/22/2024	93,9	94,4	92,6	91,2	24°C	
9/2/2024	93,3	93,0	91,3	90,5	22°C	
9/16/2024	94	93,9	91,9	91,8	16°C	

Tabla 9.1 Dureza Shore C en adoquines

FECHA	REFER ENCIA	25PUS 1B	50PUS 1B	75PUS 1B	100PU S1B	Tª	Comentarios
ANTES DE COLOCAR	97,4	96,5	94,1	92,1	89,8		
9/4/2023	96,9	96,4	91,3	88,1	89,6	24°C	SOL
9/18/2023	96,5	95,4	94,2	92,5	90,5	18°C	HUMEDOS/LL UVIA
10/2/2023	96,8	95,0	94,0	92,6	86,7	26°C	SOL
10/16/2023	94,5	95,0	90,4	90,6	88,0	15°C	LLUVIA
10/30/2023	96,9	96,5	96,0	90,3	87,8	11°C	HUMEDOS/LL UVIA
11/13/2023	96,2	95,1	94,4	92,4	87,6	15°C	HUMEDOS/LL UVIA
11/27/2023	96,7	95,0	93,8	90,3	88,1	7°C	HUMEDOS/LL UVIA
12/11/2023	95,4	94,8	94,7	89,3	87,4	11°C	HÚMEDOS/LL UVIA
12/22/2023	95.3	95.1	94.3	89.5	86.9	6°C	DÍAS CON Tª<0°C
1/8/2024	95.8	95.3	92.8	88.9	89.8	1°C	DÍAS CON Tª<0°C
1/22/2024	96.9	95.8	94.1	91.4	86.2	8°C	HUMEDOS
2/5/2024	96.7	96.1	93.4	90.1	89	9°C	
2/19/2024	96.6	95.3	91.1	87.7	86.9	12°C	
3/4/2024	96.8	94.9	92.6	90.5	84.9	8°C	NEVADA FINDE SEMANA/LLU VIA DÍA
3/18/2024	96.5	95.5	93.5	88.7	85.1	18°C	SOLEADO/SIN HELADAS
4/1/2024	96.1	94.4	91.4	88.4	87	7°C	
4/15/2024	95.8	94.1	93.3	89.4	85.9	13°C	DÍAS DE CALOR
4/30/2024	96.2	95.5	93.5	89.7	87	13°C	
5/13/2024	96.2	94.3	92.1	89	87.1	19°C	
5/27/2024	96.3	94	93.1	86.6	85.3	13°C	
6/10/2024	96.8	95.2	92.3	88.7	84.7	13°C	
6/24/2024	95.2	94.4	93.1	90.2	86.8	19°C	
7/8/2024	96.4	95.1	93.8	92.1	90.1	25°C	
7/22/2024	95.3	93.4	93.8	92.8	89.8	24°C	
9/2/2024	96.2	94.1	92.3	92.2	89.8	22°C	
9/16/2024	95.9	95	93.5	92.8	90	16°C	

Tabla 9.2 Dureza Shore C en bloques

9.4.3 Dureza Shore en adoquines

Analizando la evolución de la dureza Shore de los adoquines durante un año se puede ver una relación directa con las condiciones climáticas. Se observa una disminución de la dureza en periodos de humedad y bajas temperaturas, especialmente entre octubre y enero, lo que indica una posible absorción de agua o reducción temporal de rigidez. A partir de febrero, los valores de dureza aumentan progresivamente con la mejora del clima, alcanzando máximos en los meses cálidos.

La muestra de referencia mantiene estabilidad con variaciones mínimas y valores elevados durante todo el periodo. Las referencias 20PUS10A y 40PUS10A presentan fluctuaciones más marcadas, especialmente en meses fríos y húmedos (octubre a enero), seguidas de una recuperación progresiva en condiciones climáticas más favorables. La referencia 60PUS10A es la más susceptible a las variaciones ambientales, mostrando una disminución significativa de la dureza en periodos adversos. En general, todas las referencias evidencian una recuperación de la dureza a partir de febrero, alineada con el aumento térmico.

En general, los adoquines demuestran buena capacidad de recuperación tras condiciones adversas, manteniendo su rendimiento estructural.

9.4.4 Dureza Shore en bloques

El análisis de la evolución de la dureza Shore de los bloques muestra fluctuaciones relacionadas con las condiciones ambientales. La referencia 25PUS1B mantiene un comportamiento relativamente estable, con una dureza elevada a lo largo del año, con ligeras variaciones en torno a 95-97,4. Las referencias 50PUS1B y 75PUS1B también presentan valores relativamente estables, aunque se observa una ligera disminución en los meses de invierno, especialmente en condiciones de humedad y temperaturas por debajo de 0°C, como en diciembre y enero.

La referencia 100PUS1B, sin embargo, muestra una mayor susceptibilidad a las variaciones climáticas, con caídas más pronunciadas en la dureza durante los periodos fríos y húmedos, como entre octubre y enero, alcanzando mínimos de 86,6-89,5 en diciembre y enero. A partir de febrero, se observa una recuperación en la dureza de todas las referencias, coincidiendo con una mejora en las condiciones térmicas, estabilizándose nuevamente en los meses cálidos, con máximos en julio y agosto.

En resumen, las referencias 25PUS1B y 50PUS1B son más resistentes a las variaciones climáticas, mientras que 100PUS1B muestra mayor sensibilidad a las condiciones ambientales adversas, pero de modo general todas las referencias presentan buena capacidad de recuperación en condiciones favorables.

Capítulo

10

Prueba piloto

10 PRUEBA PILOTO

10.1 INTRODUCCIÓN

Tras la fabricación en el laboratorio de los adoquines y bloques prefabricados, y dado que los resultados obtenidos cumplen con los requerimientos que marca la normativa en cada caso, se ha procedido a la incorporación del residuo de techos completos de vehículos triturados en un prefabricado en una empresa.

El objetivo es estudiar si, en la puesta en obra real, con las condiciones de fábrica, es posible desarrollar estos prefabricados reciclados con residuos a nivel industrial.

Para ello, se han realizado unas pruebas con diferentes dosificaciones, en las que se ha tenido que adaptar dichas cantidades a las empleadas habitualmente en la empresa, y se han fabricado una serie de 16 baldosas de cada una de estas dosificaciones, para estudiar sus propiedades. La empresa donde han tenido lugar dichas pruebas es Terrazos López, situada en Lerma, en la provincia de Burgos, que está dedicada a la fabricación y venta de productos de construcción, piedras, mármoles, granitos y todo tipo de materiales de construcción. Se trata de una empresa pionera en la provincia de Burgos en la fabricación de baldosas de exterior y adoquines hidráulicos, y es en estas baldosas en las que se ha incorporado el residuo triturado.

10.2 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

Se han fabricado una serie de baldosas con diferentes cantidades de residuo de PU de techos de vehículos triturados en su composición para estudiar sus propiedades y analizar la viabilidad de su uso real.



Figura 10.1 Baldosa en fabrica

Para poder incorporar este residuo, se añade la cantidad correspondiente dentro de la línea de producción que lleva el árido del mortero de cemento, y se mezcla posteriormente con el cemento y el agua. Tras depositar dicha mezcla en el molde de la baldosa, de dimensiones 50 cm*50 cm, se procede a su compactado y vibrado. Tras este proceso, las baldosas se pueden emplear a los pocos días para su uso en construcción. En nuestro caso, se ha procedido al estudio de sus propiedades en las instalaciones del laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e I. C. T. de la Escuela Politécnica Superior, Campus Milanera, de la Universidad de Burgos, tras un tiempo de curado de 28 días, tal y como marca la normativa.¹³⁷



Figura 10.2 Proceso de Fabricación de las baldosas

10.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Las baldosas fabricadas en la localidad de Lerma se han recepcionado en las instalaciones descritas de la Universidad de Burgos, y se ha procedido a su ensayo tras los 28 días de curado.

¹³⁷UNE-EN 1339:2004. Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.



Figura 10.3 Baldosas en embalaje



Figura 10.4 Baldosas paletizadas en las instalaciones de la UBU

Para estudiar sus propiedades se han realizado un estudio de su aspecto, dimensiones, forma, y densidad aparente, y posteriormente se han realizado ensayos de resistencias mecánicas, absorción de agua por capilaridad, y absorción de agua por inmersión, ensayos ya descritos en el capítulo 4.

El primer estudio sobre la forma y dimensiones de las baldosas fabricadas corrobora que dichos productos cumplen las tolerancias dimensionales que exige la normativa correspondiente a este producto, la UNE-EN 13748-2 Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior.¹³⁸

¹³⁸UNE-EN 13748-2 Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior.

Esta norma especifica los requisitos técnicos y los métodos de ensayo para las baldosas de terrazo prefabricadas destinadas a uso en exteriores. Establece parámetros como la resistencia a la flexión, la resistencia al deslizamiento y la absorción de agua.



Figura 10.5 Baldosa de referencia



Figura 10.6 Ensayo de absorción



Figura 10.7 Ensayo de resistencias mecánicas

Tras este primer estudio, se procede a la medición de su densidad aparente, obteniendo los resultados de la Figura 10.8.

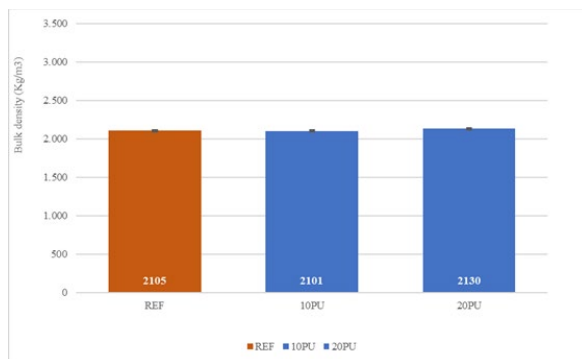


Figura 10.8 Densidad aparente

Tal y como se puede ver tras los resultados obtenidos, los valores de densidad aparente apenas varían tras la incorporación del residuo en el mortero de cemento con el que se fabrican las baldosas. Posteriormente se llevaron a cabo ensayos de absorción de agua por capilaridad, con los resultados reflejados en la Figura 10.9.

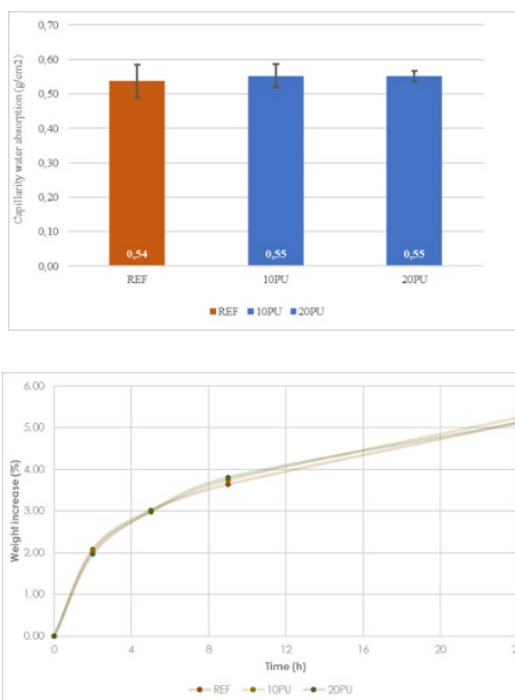


Figura 10.9 Ensayo de absorción de agua

Conjuntamente, se ha estudiado la absorción total de agua para estas baldosas. (Figura 10.10) Los resultados muestran como todos los valores son inferiores al 6% de absorción, que es el límite que marca la normativa para considerarlo de clase 2, con lo que se puede concluir que los resultados son muy positivos en este sentido.

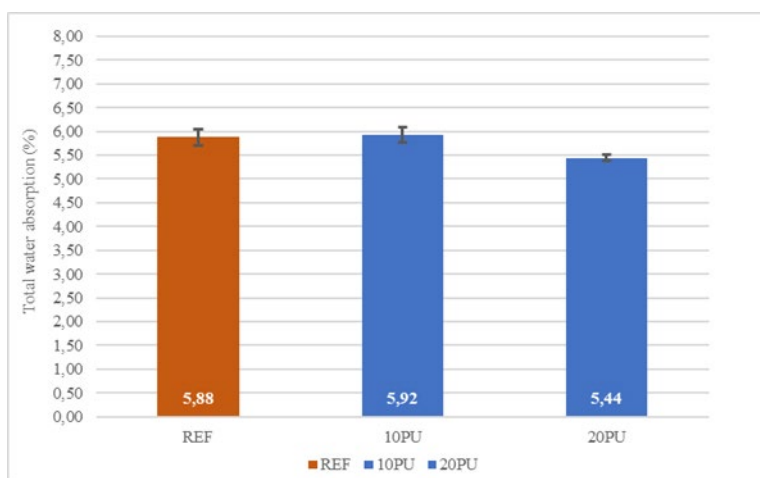


Figura 10.10 Ensayo de absorción total de agua

Además, se determinan las resistencias mecánicas de las baldosas c para las distintas dosificaciones ensayadas para la carga de rotura a flexión y la resistencia a compresión, como se observa en la Figura 10.11.

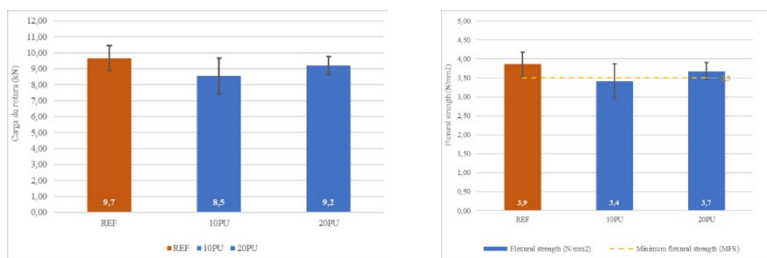


Figura 10.11 Ensayo de resistencias mecánicas

Los datos muestran cómo, en el primer caso con sustitución del 10% por residuo, el valor medio obtenido es ligeramente inferior al valor mínimo marcado por la normativa para poder considerarla de clase 1. En el segundo caso, en el que la sustitución asciende al 20%, los resultados son mayores, con una resistencia por encima de ese límite, pudiendo considerarse de clase 1.

Se puede deducir, por lo tanto, que tras los ensayos realizados esta segunda dosificación con sustitución del 20% por residuo de techos completos obtiene mejores resultados que en el primer caso, considerando este producto prefabricado de clase 1 según la normativa vigente.

Capítulo

11

**Conclusiones
finales**

11 CONCLUSIONES FINALES

En esta investigación se aborda en líneas generales el problema de la gestión de residuos de poliuretano generados principalmente por la industria automotriz, proponiendo su valorización en la fabricación de materiales de construcción prefabricados, como adoquines, bloques y baldosas de hormigón aligerado. A lo largo de la investigación, se analiza la viabilidad técnica de incorporar residuos de PU como reemplazo parcial o total de áridos naturales, estudiando en detalle sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad, así como su impacto ambiental mediante un análisis de ciclo de vida (ACV).

A continuación, se exponen las conclusiones principales de este estudio, que abarcan desde los beneficios técnicos y ambientales de utilizar residuos de PU en la construcción hasta las limitaciones que podrían afectar a su implementación a gran escala.

11.1 CONCLUSIONES PRINCIPALES

- **Reducción en el uso de áridos naturales.** La investigación demuestra que la inclusión de residuos de PU como sustituto parcial de los áridos naturales en materiales de construcción reduce de manera significativa la demanda de recursos geológicos. Al reemplazar áridos vírgenes por poliuretano reciclado, se disminuye la necesidad de extracción de materiales naturales, mitigando así el impacto ambiental asociado a la minería y preservando los recursos naturales.
- **Impulso a la sostenibilidad en la construcción.** La revalorización de residuos de polímero fomenta un enfoque sostenible en la construcción. Este reemplazo no solo disminuye la dependencia de recursos naturales, sino que también contribuye a reducir las emisiones de CO₂ generadas en la producción de cemento. Además, reutilizar residuos de PU contribuye a la disminución del volumen de desechos enviados a vertederos, apoyando una gestión más responsable y sostenible de los residuos industriales.
- **Propiedades beneficiosas del poliuretano para aplicaciones constructivas.** Los residuos de poliuretano triturados ofrecen propiedades beneficiosas para aplicaciones constructivas que pueden mejorar tanto la funcionalidad como la sostenibilidad de los productos prefabricados utilizados en la construcción.

En primer lugar, su flexibilidad medida en los ensayos mecánicos, demuestra ser una propiedad clave, ya que estos residuos mantienen una buena capacidad de absorción de impactos y vibraciones, lo que los hace ideales para aplicaciones que exigen elasticidad, prolongando la durabilidad de productos prefabricados y reduciendo el desgaste en estructuras sometidas a movimientos o presiones constantes. Además, la hidrofobicidad natural del poliuretano triturado proporciona una barrera contra la humedad, lo que es fundamental en entornos exteriores o húmedos, ya que minimiza la absorción de agua y previene daños derivados de la exposición prolongada al agua, contribuyendo así a la longevidad de los materiales.

Otro beneficio importante es su durabilidad, con una notable resistencia a la abrasión y el desgaste. Esto los convierte en una excelente opción para aplicaciones constructivas en entornos agresivos o expuestos a condiciones climáticas adversas, donde hay que tener en cuenta la resistencia a factores ambientales.

Los residuos de poliuretano triturados también contribuyen a mejorar el aislamiento térmico de los materiales de construcción. Aunque no iguala las propiedades aislantes de la espuma de poliuretano en su estado original, esta característica puede ser ventajosa para aumentar la eficiencia energética.

La combinación de estas propiedades hace de los residuos de poliuretano triturados una opción altamente eficiente y duradera que aporta valor añadido a los productos constructivos, adaptándose a las exigencias de durabilidad, resistencia y sostenibilidad actuales.

- **Innovación en la gestión de residuos.** La valorización de los residuos de PU como material en la industria de la construcción representa una solución innovadora para la gestión de estos desechos, tradicionalmente destinados a vertederos. Esta práctica promueve los principios de la economía circular, transformando los residuos en recursos valiosos para la fabricación de elementos prefabricados como bloques, adoquines y baldosas, y puede servir de ejemplo para implementar prácticas similares en otros sectores industriales.
- **Ciclo de vida.** El análisis del ciclo de vida (ACV) de los adoquines y bloques de cemento aligerados con residuos industriales de poliuretano, comparándolos con los productos convencionales para evaluar su impacto ambiental abarca varios aspectos, incluyendo el consumo de recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero,

la generación de residuos y el potencial de reciclaje. Las conclusiones indican que los prefabricados con residuos de poliuretano presentan una menor huella ecológica en comparación con los productos tradicionales. Esto se debe a que la incorporación de residuos de poliuretano reduce la necesidad de materiales vírgenes, disminuye las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento y áridos, y aprovecha un residuo industrial que de otro modo sería desechado. Además, cabe destacar que estos prefabricados tienen un buen comportamiento en términos de durabilidad y resistencia, lo que contribuye a su viabilidad técnica y económica en la construcción. En resumen, el uso de excedentes de poliuretano en la fabricación de adoquines y bloques de cemento no solo mejora las propiedades de estos materiales, sino que también ofrece una solución sostenible para la gestión de residuos industriales, promoviendo la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

11.2 LIMITACIONES

- **Variabilidad en las propiedades de los residuos.** Una limitación importante identificada es la heterogeneidad en la calidad y propiedades de los residuos, que dependen del origen y proceso de fabricación. Esta variabilidad afecta la consistencia en las propiedades mecánicas y físicas de los productos de construcción resultantes.
- **Escalabilidad.** Aunque los resultados en laboratorio son prometedores, la implementación de este proceso a nivel industrial implica desafíos importantes. La escalabilidad requiere una evaluación exhaustiva de los costos y de la viabilidad técnica, así como de los aspectos logísticos involucrados. La adaptación de estos procesos a una escala mayor necesitará análisis detallados para asegurar que la producción sea viable y económicamente rentable.
- **Cumplimiento de normativas y regulaciones.** Para emplear residuos de PU en materiales de construcción, es necesario cumplir con las normativas vigentes en la industria. Esto incluye la realización de pruebas adicionales y la obtención de certificaciones que aseguren la seguridad y la calidad de los productos. Este proceso puede ser largo y representar un obstáculo para la introducción de estos materiales en el mercado de forma rápida.

Capítulo

12

**Futuras líneas de
investigación**

12 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- ✓ Durante la realización de esta investigación ha sido complicado llegar a analizar en profundidad diversos aspectos que han ido apareciendo debido a sus características, y que se proponen como líneas de investigación para desarrollar en un futuro:
- ✓ Finalizar el estudio del comportamiento de reacción al fuego de los bloques prefabricados, ya que por razones logísticas no ha sido posible fabricar la muestra necesaria para ello ni ensayarla. De este modo, se podría obtener una clasificación normativa frente al fuego y así valorar su viabilidad como producto comercial.
- ✓ Valorar la posibilidad del empleo de otro tipo de aditivos o de materiales de cambio de fase (PCM) en estos nuevos materiales de construcción y estudiar su comportamiento, con el objetivo de mejorar alguna de las características de los prefabricados estudiados.
- ✓ Evaluar estos materiales a largo plazo mediante la puesta obra y monitorización de los productos finales. Analizar, de este modo, su comportamiento en condiciones reales, especialmente en el caso de las baldosas, ya que para los bloques y adoquines la realización del demostrador nos permite tener una orientación práctica en esta situación.
- ✓ Considerar la posibilidad de comercialización de estos productos mediante su escalado a nivel industrial. Analizar la viabilidad en este aspecto de los prefabricados, considerando adaptación la industria a estos nuevos materiales mediante la introducción de una máquina de triturado de residuos en fábrica, así como una nueva línea de suministro para este nuevo producto. De este modo se podría estudiar su implantación en instalaciones de prefabricados ya existentes.
- ✓ Realizar una evaluación no solo medioambiental (ACV) de estos nuevos materiales, si no también económica (ACV-C) y social (ASV-S), para disponer del análisis de sostenibilidad y del impacto de estos nuevos materiales en los tres pilares fundamentales que contempla el desarrollo sostenible. De este modo se alcanzaría una consideración de todas las implicaciones posibles en los productos, teniendo en cuenta en dichas evaluaciones todas las fases, desde la extracción de las materias primas hasta el tratamiento final de vida.

Capítulo

13

**Referencias
bibliográficas**

13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aciu, C., Ilutiu-Varvara, D. A., Manea, D. L., Orban, Y. A., & Babota, F. (2018). *Recycling of plastic waste materials in the composition of ecological mortars*. Paper presented at the Procedia Manufacturing.

Aguas de Burgos. "Análisis del agua según RD 140/2003" from [https://aguasdeburgos.com/wp-content/uploads/2017/08/Agua TRATADA 2014.pdf](https://aguasdeburgos.com/wp-content/uploads/2017/08/Agua_TRATADA_2014.pdf)

Ahmed, S. R., Khedher, M. F., & Al-Zubaidi, A. B. (2020). The mechanical properties of green cement mortar dip-coated with polyurethane polymer. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(2), 239-246.

Alameda, L. (2014) Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra. [Tesis doctoral] Universidad de Burgos.

Alameda-Cuenca-Romero, L., Arroyo, R., Alonso, Á., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2022). Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes. *Journal of Building Engineering*, 50. doi: 10.1016/j.job.2022.104075

Arroyo, R. (2017) Addition of new polymer-based and mineral-based fillers in mortar: influences of polyurethane and afwillite on the microstructure and final properties. [Tesis doctoral] Universidad de Burgos.

Asadi Ardebili, A., Villoria Sáez, P., González Cortina, M., Tasán Cruz, D. M., Rodríguez Sáiz, Á., & Atanes-Sánchez, E. (2023). Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. *Construction and Building Materials*, 370. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130675

Aukour, F. J. (2009). Feasibility study of manufacturing concrete eco-blocks using marble sludge powder as raw materials. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 120, 845-852. doi: 10.2495/SDP090792

BioSysmo. www.biosysmo.eu

Bouzar, B., Benzerzour, M., & Abriak, N.-E. (2024). Evaluation of mineral eco-binders from secondary raw materials: environmental assessments. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(4), 2546-2566. doi: 10.1007/s10163-024-01995-7

Bravo-German, A. M., Bravo-Gómez, I. D., Mesa, J. A., & Maury-Ramírez, A. (2021). Mechanical properties of concrete using recycled aggregates

obtained from old paving stones. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). doi: 10.3390/su13063044

Briones-Llorente, R., Barbosa, R., Almeida, M., García, E. A. M., & Saiz, A. R. (2020). Ecological design of new efficient energy-performance construction materials with rigid polyurethane foam waste. *Polymers*, 12(5). doi: 10.3390/POLYM12051048

Cardinale, T., Sposato, C., Alba, M. B., Feo, A., & De Fazio, P. (2019). Energy performance of construction materials using waste recycled polymer as fine aggregate replacement. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 696-704. doi: 10.18280/ijht.370305

Chandrappa, R., & Das, D. B. (2024). Waste quantities and characteristics. In *Solid Waste Management: Principles and Practice* (pp. 47-87). Cham: Springer International Publishing.

Chioatto, E., & Sospiro, P. (2023). Transition from waste management to circular economy: the European Union roadmap. *Environment, Development and Sustainability*, 25(1), 249-276.

Corinaldesi, V., Mazzoli, A., & Moriconi, G. (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials and Design*, 32(3), 1646-1650. doi: 10.1016/j.matdes.2010.10.013

CONTRABASS MSCA. (s.f.). *Zero-CO2 Cement Through Carbonation of Calcium Silicates and aluminates*. From www.contrabass-msca.eu

Cuenca-Romero, L. A., Arroyo, R., Alonso, Á., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2022). Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes. *Journal of Building Engineering*, 50. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104075

Da Silva, L. R. R., Francisco, M. B., Martins, R. M., Gonçalves, P. C., Dos Santos, V. C., Gomes, G. F., & Melo, M. D. L. N. M. (2023). RSM-Based Modeling and Optimization of Cementitious Composites with Polyurethane Powder Waste and Foundry Exhaust Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(3). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004627

De Melo, A. B., & Silva, E. P. (2013). Lightweight concrete blocks with EVA recycled aggregate: A contribution to the thermal efficiency of building external walls. *Materiales de Construcción*, 63(312), 479-495. doi: 10.3989/mc.2013.05912

Degradación de poliuretano y aplicaciones tecnológicas from <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/143623/DIAZ%20PANEA%2c%20FRANCISCO%20JOSE.pdf?sequence=1>

Dey, S., Veerendra, G. T. N., Babu, P. A., Manoj, A. P., & Nagarjuna, K. (2024). Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review. *Biomedical Materials & Devices*, 2(1), 70-112.

DICYT “El poliuretano encuentra una segunda vida útil como material de construcción” from <https://www.dicyt.com/viewNews.php?newsId=40319>

Doleželová, M., Scheinherrová, L., Krejsová, J., Keppert, M., Černý, R., & Vimrová, A. (2021). Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers. *Construction and Building Materials*, 297. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123791

ECO-Binder Project. Facebook, <https://www.facebook.com/ecobinder.eu/>

Eco-Performance of Alternative Binder Systems https://www.mdpi.com/journal/applsci/special_issues/binder_systems

El Español - "El bloque de hormigón que cambiará la construcción” from https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20240115/bloque-hormigon-cambiara-construccion-ligero-vecas-resistente/823417724_0.html

EUR-Lex. "Integrated product policy" from <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/integrated-product-policy.html>

EUR-Lex. “Decisión 96/603/CE” from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A31996D0603>

EUR-Lex. “Strategy on the prevention and recycling of waste” from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=uriserv:l28168>

European Commission. "Plastics" from https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en

European Commission. “Circular economy action plan” from https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

European Commission: A developed thermochemical approach for catalytic depolymerization of plastics (CATALEPTIC) <https://cordis.europa.eu/project/id/101033386>

European Commission: Advanced and sustainable recycling processes and value chains for plastic-based multi-materials (MultiCycle)
<https://cordis.europa.eu/project/id/820695>

European Commission: BIOremediation systems exploiting Synergies for improved removal of Mixed Pollutants (BIOSYSMO)
<https://cordis.europa.eu/project/id/101060211>

European Commission: CO2 absorbing Materials Project-RISE (CO2MPRISE)
<https://cordis.europa.eu/project/id/734873>

European Commission: zero-CO2 Cement Through Carbonation of Calcium Silicates and aluminates (CONTRABASS)
<https://cordis.europa.eu/project/id/101119715>

European Commission: Development of insulating concrete systems based on novel low CO2 binders for a new family of eco-innovative, durable and standardized energy efficient envelope components. (ECO-Binder)
<https://cordis.europa.eu/project/id/637138>

European Commission: Ecological Low Impact Production Sport Elastomer (ECLIPSE) <https://cordis.europa.eu/project/id/735976/reporting>

European Commission: Policies and Research for an Integrated Management of Urban Sustainability (PRIMUS)
<https://cordis.europa.eu/project/id/226814>

European Commission: Recovery of Polyurethane for Reuse in eco-efficient materials. (LIFE REPOLYUSE)
<https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE16-ENV-ES-000254/recovery-of-polyurethane-for-reuse-in-eco-efficient-materials>

European Commission: Second generation Methyl Methacrylate (MMAtwo)
<https://cordis.europa.eu/project/id/820687>

Ferraz, D., & Pyka, A. (2023). Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-22.

Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., & Cheeseman, C. R. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285-292. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028

Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and*

Concrete Composites, 32(9), 672-677. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017

Giannetti, B. F., Lopez, F. J. D., Liu, G., Agostinho, F., Sevegnani, F., & Almeida, C. M. (2023). A resilient and sustainable world: Contributions from cleaner production, circular economy, eco-innovation, responsible consumption, and cleaner waste systems. *Journal of cleaner production*, 384, 135465.

Gómez, J., Santos, N., & Martinez, R. (2023). Construction of pavers from drilling cuttings as an alternative for environmental management of waste. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 21, 545-550. doi: 10.24084/repqj21.388

Gómez-Rojo, R., Alameda, L., Rodríguez, A., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2019). Characterization of polyurethane foam waste for reuse in eco-efficient building materials. *Polymers*, 11(2). doi: 10.3390/POLYM11020359

Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653-658. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055

Ideas en ciencia - "Diseño y elaboración de adoquines de pet reciclado" from http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/66911/REVISTA%20DEAS_VOL_44_1_DISEN%C3%8C%20O.pdf?sequence=3

Informe MI I-2021-0007 CENIEH Laboratorio de Microscopía y Microtomografía Computarizada.

Informes de la Construcción. M. Madrid, Y. García Frómata, J. Cuadrado, A. Rodríguez, JM. Blanco. "Análisis de ciclo de vida en bloques de hormigón: comparación del impacto producido entre bloques tradicionales y con subproductos." (2022) from <https://doi.org/10.3989/ic.88125>

Jambeck, J. R., & Walker-Franklin, I. (2023). The impacts of plastics' life cycle. *One Earth*, 6(6), 600-606.

Jiao, H., Ali, S. S., Alsharbaty, M. H. M., Elsamahy, T., Abdelkarim, E., Schagerl, M., ... & Sun, J. (2024). A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: Challenges, research gaps, and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 271, 115942.

Jimenez del Barco-Carrion, A., Perez Martinez, M., Themeli, A., Lo Presti, D., Marsac, P., Pouget, S., Airey, G. D. (2017). Evaluation of biomaterials'

rejuvenating effect on binders for high-reclaimed asphalt content mixtures. *Materiales de Construcción*, 67(327). doi: 10.3989/mc.2017.04516

Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2012). Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1174-1179. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.006

Junta de Castilla y León. "Plan Sectorial del Hábitat de Castilla y León 2021" from

https://transparencia.jcyl.es/participacion/Participaci%C3%B3n%20Econom%C3%ADa%20y%20Hacienda/Plan_Sectorial_Habitat.pdf

Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023). *Plastic waste: challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management*. *International Journal of Environmental Research*, 17(1), 20.

Kumaresan, S., Subramanian, J., Selvaraj, V. K., Lazar, P., Raja, S., Raju, M. P., & Nath, A. K. (2024). *A Comparative Study of Gypsum-Based Composites with Waste Recycling for Electrical Properties in Futuristic Applications*. Paper presented at the Sustainable Civil Infrastructures.

Life Repolyuse from <https://life-repolyuse.com>

Mahoutian, M., & Shao, Y. (2016). Production of cement-free construction blocks from industry wastes. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1339-1346. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.012

Malbila, E., Kounngwe, A. G. L., & Toguyeni, D. Y. (2024). Multicriteria analysis of the components of ecological paving stones made from plastic and glass waste, and granular reinforcements. *Open Ceramics*, 18, 100604.

MDPI. I Santamaría-Vicario, L. Alameda Cuenca-Romero, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, A. Rodríguez. "Design and Characterization of Gypsum Mortars Dosed with Polyurethane Foam Waste PFW" (2020) from <https://doi.org/10.3390/ma13071497>

Mezheri, A., Benzarti, M., Ivanov, D., & Lallam, A. (2024, 2024/). Development of a New ECO-Friendly Binder for Textile Industry. Paper presented at the Proceedings of the 10th International Conference of Applied Research on Textile and Materials, Cham.

MMAtwo: <https://www.mmatwo.eu/>

Mohammed, S. A., Shakor, P., S, S., Rauniyar, A., Krishnaraj, L., Kumar Singh, A., & Laghi, V. (2023). An environmental sustainability roadmap for partially substituting agricultural waste for sand in cement blocks. *Frontiers in Built Environment*, 9. doi: 10.3389/fbuil.2023.1214788

Mong, G. R., Tan, H., Sheng, D. D. C. V., Kek, H. Y., Nyakuma, B. B., Woon, K. S., ... & Wong, K. Y. (2023). A review on plastic waste valorisation to advanced materials: Solutions and technologies to curb plastic waste pollution. *Journal of Cleaner Production*, 140180.

Mukherjee, P. K., Das, B., Bhardwaj, P. K., Tampha, S., Singh, H. K., Chanu, L. D., ... & Devi, S. I. (2023). Socio-economic sustainability with circular economy—an alternative approach. *Science of The Total Environment*, 166630.

MultiCycle:<https://multicycle-project.eu/>

Olofinnade, O., Ede, A., Ndambuki, J., Omole, D., Jolayemi, K., Oyeyemi, K., . . . Ukoh, A. (2019). *Sustainable utilization of crushed waste glass as sand replacement for production of eco-friendly interlocking paving stones*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Ortiz-de-Montellano, C. G. S., Samani, P., & van der Meer, Y. (2023). How can the circular economy support the advancement of the Sustainable Development Goals (SDGs)? A comprehensive analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 352-362.

Pandey, P., Dhiman, M., Kansal, A., & Subudhi, S. P. (2023). Plastic waste management for sustainable environment: techniques and approaches. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5(2), 205-222.

Plastics Europe. "Plastics - the facts 2023" from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2023/>

Podawca, K., & Grzymała, A. (2021). Comparative analysis of selected features of traditional and photocatalytical paving stones. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 30.

Prefabricados Jara – “¿Qué son los adoquines de hormigón ecológico con efecto catalítico?” from <https://www.prefabricadosjara.com/adoquines-de-hormigon-ecologico-efecto-fotocatalitico/>

Proyecto Eclipse <https://project-eclipse.eu/>

<https://www.gitco.unican.es/proyectos/POLYMIX/Principal.html>

Reciclaje Contemar - “Adoquines de caucho reciclado: duraderos y ecológicos” from <https://www.reciclaecontemar.es/adoquines-de-caucho-reciclado/>

Rodrigo-Bravo, A., Alameda Cuenca-Romero, L., Calderón, V., Rodríguez, Á., & Gutiérrez-González, S. (2022). Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile. *Energy and Buildings*, 259. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111867

Ruiz-Herrero, J. L., Velasco Nieto, D., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., . . . Rodríguez-Pérez, M. Á. (2016). Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 104, 298-310. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005

Salem, T., Shehadeh, D., Bouchenafa, O., & Florence, C. (2023). Feasibility of using polyurethane waste in the form of granules for civil construction. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(6), 3812-3823. doi: 10.1007/s10163-023-01807-4

S&P. “La economía circular en la construcción” from <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/economia-circular-construccion/>

San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.040

Santamaría-Vicario, I., Alameda-Cuenca-Romero, L., Gutiérrez-González, S., Calderón-Carpintero, V., & Rodríguez-Saiz, A. (2020). Design and characterization of gypsum mortars dosed with polyurethane foam waste PFW. *Materials*, 13(7). doi: <https://doi.org/10.3390/ma13071497>

Savini, F. (2023). Futures of the social metabolism: Degrowth, circular economy and the value of waste. *Futures*, 150, 103180.

Science Direct. A. Rodrigo-Bravo, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González. “Evaluación comparativa del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) entre losas de yeso para cielo raso estándar y losetas para cielo raso de yeso de poliuretano. Energía y Edificación.” (2022) from <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867>

Science Direct. L. Alameda Cuenca-Romero, R. Arroyo, Á. Alonso, S. Gutiérrez-González, V. Calderón. "Caracterización de las propiedades y comportamiento al fuego de bloques de cemento con residuos de cubierta de poliuretano reciclado" (2022) from <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104075>

Science Direct. MA Pedreño-Rojas, J. Fort, R. Cerny, P. Rubio-de-Hita. "Evaluación del ciclo de vida de la producción de yeso natural y reciclado en el contexto español" (2020) from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>

Simonnet, C. (2009). Hormigón: historia de un material: economía, técnica, arquitectura, Editorial Nerea.

Springer Link "Polyurethanes in the construction industry" from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-4954-9_4

Springer Link "Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review" from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16980-y?fromPaywallRec=true>

Statista (2024). El mundo está inundado de residuos plásticos <https://es.statista.com/grafico/30051/produccion-mundial-de-residuos-plasticos-por-tipo/>

Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G., & Soto-Oñate, D. (2019). Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. *Journal of cleaner production*, 214, 952-961.

Sutomo, B., Mukhlis, M., & Ahadiat, A. (2023). A Circular Economy, Waste Management, and Sustainable Development: A Case Study of a Transmigration Rural Area on the Indonesian Island of Sumatra. *Quality-Access to Success*, 24(192).

Técnicas Reunidas. "Proyecto ECLIPSE: Investigación de Nuevas Tecnologías de Reciclado y Valorización de Residuos Plásticos Complejos." <https://project-eclipse.eu>

Thongchua, G., Suwan, T., Jitsangiam, P., Wattanachai, P., Kamthai, S., Thongchua, H., . . . Yamuangmorn, S. (2023). *Utilization of Rice Straw Wastes as Aggregate in Lightweight Concrete Block Production by Using Cold Press Technique*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127

UNE-EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo para mortero para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente seca del mortero endurecido.

UNE-EN 1015-18:2003. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

UNE-EN 1015-19:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.

UNE-EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

UNE-EN 12370:2020. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.

UNE-EN 12390-3:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

UNE-EN 127338:2022. Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón.

UNE-EN 13139:2003 Áridos para morteros.

UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 1339:2004 Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 13501:2019. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación.

UNE-EN 13501-1:2009 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación.

UNE-EN 13748-2 Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior.

UNE-EN 13823:2021 Ensayos de reacción al fuego de productos de construcción. Productos de construcción, excluyendo revestimientos de suelos, expuestos al ataque térmico provocado por un único objeto ardiendo.

UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

UNE-EN 772-1 Métodos de ensayo para bloques de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.

UNE-EN 933-2:2022. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

UNE-EN ISO 1182:2021. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad

UNE-EN ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

UNE-EN ISO 14041. Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario.

UNE-EN ISO 14042. Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida.

UNE-EN ISO 14043. Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Interpretación del ciclo de vida.

UNE-EN ISO 1716:2021 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del poder calorífico superior (valor calorífico)

Upadhayay, S., Alqassimi, O., Khashadourian, E., Sherm, A., & Prajapati, D. (2024). Development in the Circular Economy Concept: Systematic Review in Context of an Umbrella Framework. *Sustainability*, 16(4), 1500.

Zolfaghari, M. (2024). Energy Saving Evaluation Based on Utilizing Recycled PET Bottles in Concrete Blocks in Iran *EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems II* (pp. 223-239).

Anexo

**Seguimiento de la
evolución del
demostrador**

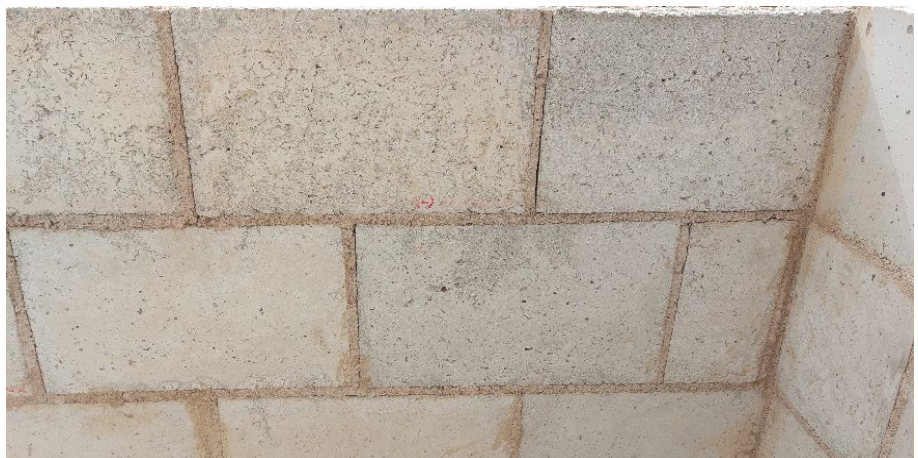


Figura A1.1 Aspecto general 4 septiembre 2023



Figura A1.2 Aspecto general 18 septiembre 2023. Muestras húmedas por lluvia



Figura A1.3 Aspecto general 2 de octubre 2023



Figura A1.4 Aspecto general 16 de octubre 2023

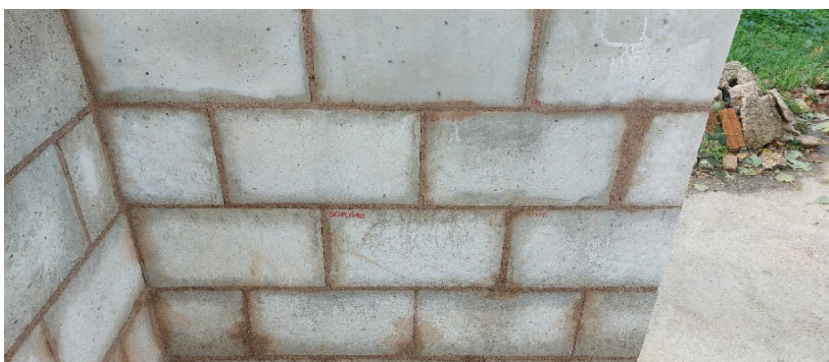
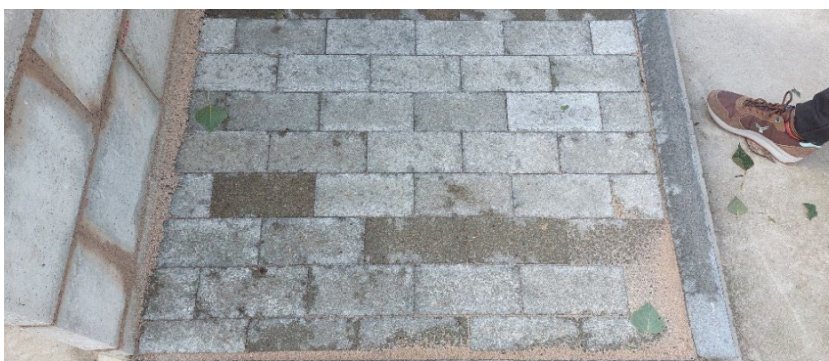


Figura A1.5 Aspecto general 30 de octubre 2023



Figura A1.6 Aspecto general 13 de noviembre 2023



Figura A1.7 Aspecto general 27 de noviembre 2023



Figura A1.8 Aspecto general 11 de diciembre 2023

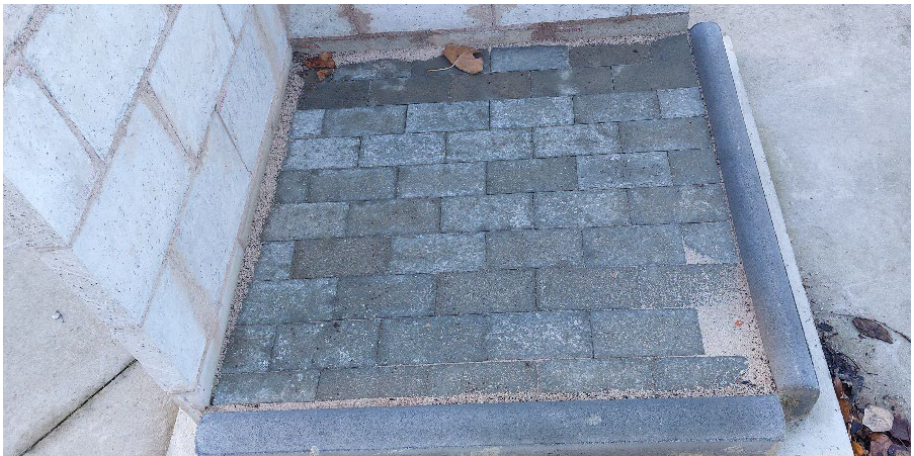


Figura A1.9 Aspecto general 22 de diciembre 2023



Figura A1.10 Aspecto general 8 de enero 2024



Figura A1.11 Aspecto general 22 de enero 2024

ANEXO



Figura A1.12 Aspecto general 5 de febrero 2024





Figura A1.13 Aspecto general 19 de febrero 2024





Figura A1.14 Aspecto general 4 de marzo 2024





Figura A1.15 Aspecto general 18 de marzo 2024





Figura A1.16 Aspecto general 1 de abril 2024



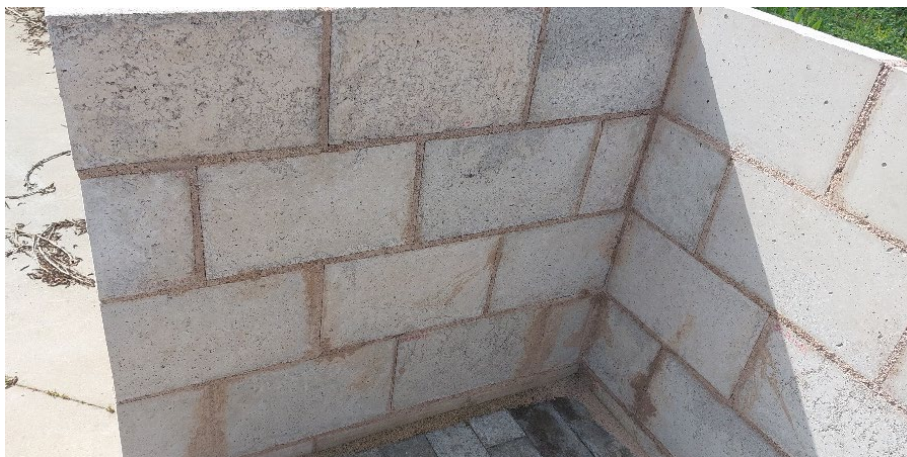


Figura A1.17 Aspecto general 15 de abril 2024





Figura A1.18 Aspecto general 30 de abril 2024

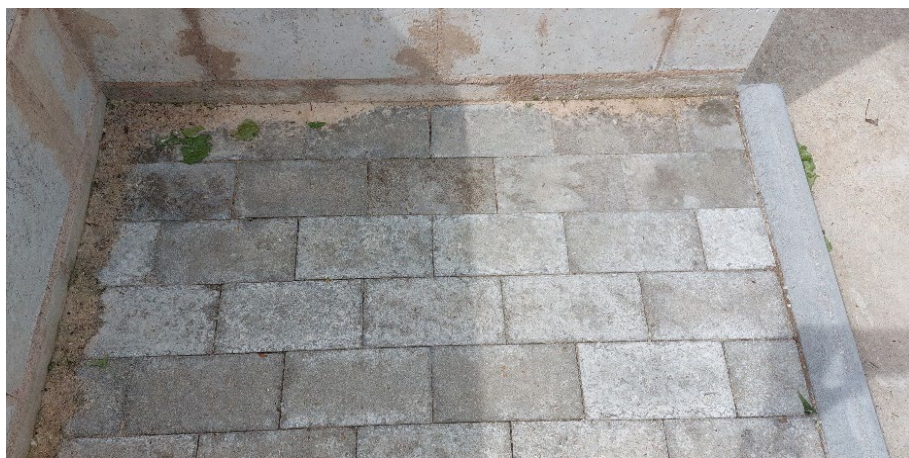




Figura A1.19 Aspecto general 13 de mayo 2024





Figura A1.20 Aspecto general 27 de mayo 2024





Figura A1.21 Aspecto general 10 de junio 2024





Figura A1.22 Aspecto general 24 de junio 2024



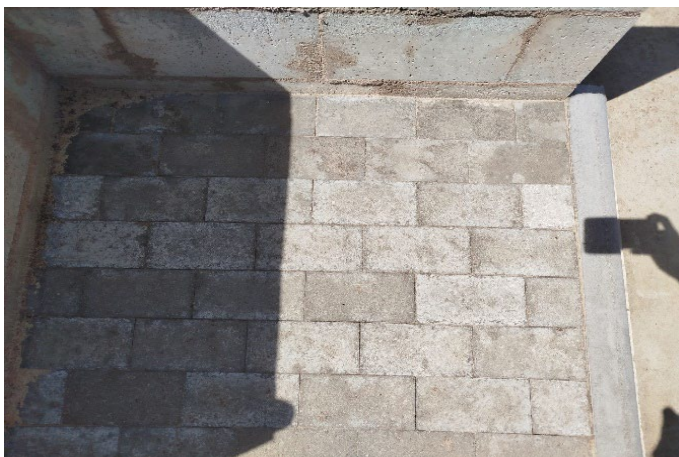


Figura A1.23 Aspecto general 8 de julio 2024





Figura A1.24 Aspecto general 22 de julio 2024



Figura A1.25 Aspecto general 2 de septiembre 2024



Figura A1.26 Aspecto general 16 de septiembre 2024

